



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Diseño de una habitación climatizada con cero
energías convencionales, considerando el enfoque
adaptativo**

presentada por

Ing. Jessica Gabriela Sánchez Montes

Como requisito para la obtención del grado de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. José Jassón Flores Prieto

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2021



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

"2020, Año de Leona Vicario, Benamérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Mor., 09/diciembre/2020

OFICIO No. DIM/186/2020

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la Ing. Jessica Gabriela Sánchez Montes con número de control M19CE009, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "Diseño de una habitación climatizada con cero energías convencionales, considerando el enfoque adaptativo" y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. José Jassón Flores Prieto
Director de tesis

Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Revisor 1

Dr. Efraim Simá Moo
Revisor 2

Dr. Javier Ortiz Hernández
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
Iniciales ABO/mrrr





"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos **16/diciembre/2020**

OFICIO No. SAC/ 286/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

JESSICA GABRIELA SÁNCHEZ MONTES
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado *"Diseño de una habitación climatizada con cero energías convencionales, considerando el enfoque adaptativo"*, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



**CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CMAZ/CHG

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México- Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) por la oportunidad de continuar con mi formación académica y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por proveer el apoyo financiero que me permitió continuar con mis estudios.

A mis padres, hermanas y a mi sobrino.

José I. Sánchez y Dolores Montes, no encuentro palabras para agradecer su infinito amor y no me alcanzaría la vida para agradecerles. Gracias a Dios por tenerlos, gracias por su amor y sus consejos. Además, de la fuerza y el impulso que siempre me dan para salir adelante, los amo infinitamente y nada sería posible sin ustedes. Viridiana y Lizandra por el amor incondicional que me dan, por enseñarme a ser fuerte, por escucharme y estar en los momentos más difíciles, no sé qué haría sin ustedes, las amo con el corazón. A mi sobrino Maximiliano por ser la alegría de mi vida y darme esa sonrisa que siempre ilumina la casa.

A mi director de tesis.

Agradezco al Dr. José Jassón Flores Prieto por su confianza, su orientación y por ser un buen guía, quien, con su experiencia y conocimiento, me motivó para el desarrollo de este trabajo. Además, le agradezco su amistad y sus buenos consejos que me brindó a lo largo de la maestría.

A mi comité revisor.

A la Dra. Sara Lilia Moya Acosta, Dr. Efraín Simá Moó y Dr. Javier Ortiz Hernández, por todos sus comentarios, por cada una de sus palabras y por los valiosos aportes en el desarrollo de este trabajo.

Al personal administrativo y al departamento de Ingeniería Mecánica.

Por la atención que siempre me brindaron, especialmente a la Sra. Roció Salazar Ruiz por ser tan buena persona y siempre brindarme su apoyo.

A todos los profesores de Ingeniería mecánica

Que admiro y respeto, por su conocimiento y su gran calidad humana.

Al Laboratorio de Energía Solar

A mis compañeros y a las buenas amistades que hice en este camino, por sus críticas y comentarios, Danier, Alexis, Francisco, Arleth, Luis, Sergio, Sandra, Samantha, Mauricio y a todos los que formaron parte, por todas las buenas tardes de risa y por todos los momentos que pasamos juntos.

A mis compañeros y amigos del CENIDET

A todos los buenos amigos y compañeros que hice en este proceso, especialmente a la generación enero-2019; a todos mis amigos de diseño mecánico y a los de térmica, a mi amiga Ana Lilia por todos sus consejos y apoyo y por llegar a ser una de mis mejores amigas.

A mis amigas de la vida

Dulce Garcilazo, Dulce Díaz y Daira Colín por ser buenas amigas, por todo lo que hemos pasado y aprendido juntas, las amo por todo lo bonito que han traído a mi vida. Agradezco también a sus papás, especialmente a la Sra. Irma y al Sr. Miguel, por incluirme en su familia y ser tan buenos conmigo.

Dedicatoria

Dedico con todo mi corazón y con una gran satisfacción este trabajo a:

A Dios.

por todas las bendiciones que me ha dado a lo largo de mi vida, por mi familia tan maravillosa y por darme fuerzas para siempre continuar.

A mis padres

por todo su amor y lo que me han enseñado, me han dado todo lo que soy como persona, mis valores y mis principios. Son lo mejor que tengo en la vida, porque siempre me inspiran y ayudan, no me alcanzaría la vida para agradecerles todo lo que hacen por mí.

A mis hermanas.

por estar siempre a mi lado, por su cariño, amor y confianza, son dos grandes mujeres a las que admiro y respeto por su gran fortaleza, las dos son un claro ejemplo de resiliencia.

Contenido

Pág.

Lista de Figuras	III
Lista de Tablas	V
Nomenclatura	VII
Acrónimos y siglas	IX
Resumen	X
Capítulo 1: Introducción	1
<i>1.1 Motivación</i>	2
<i>1.2 Revisión bibliográfica</i>	4
1.2.1 Diseño de edificios de bajo o nulo consumo de energía convencional	4
1.2.2 Ahorro en la carga térmica de enfriamiento implementando estrategias de mitigación energética ..	9
1.2.3 Parámetros de confort térmico utilizando el enfoque adaptativo	14
1.2.4 Optimización energética en edificaciones considerando el enfoque adaptativo	19
1.2.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica	21
<i>1.3 Objetivos y alcances</i>	21
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos	22
1.3.3 Alcances.....	22
<i>1.4 Estructura de Tesis</i>	22
Capítulo 2: Materiales y métodos	23
<i>2.1 Fundamentos teóricos</i>	24
2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor	24
2.1.2 Geometría solar	25
2.1.3 Plataforma de simulación.....	26
<i>2.2 Confort térmico</i>	28
2.2.1 Parámetros que afectan el confort térmico.....	28
2.2.2 Modelos de confort estático/adaptativo	32
<i>2.3 Estrategias de mitigación de consumo energético</i>	37
<i>2.4 Caso de estudio</i>	40
2.4.1 Habitación tipo hospital	40
2.4.2 Edificio donde se ubica la habitación de estudio	41
2.4.3 Selección de la localidad de estudio	44
<i>2.5 Metodología</i>	48
2.5.1 Física del problema	48
2.5.2 Optimización en la climatización de la habitación hacia cero energías convencionales.....	50
<i>2.6 Estudio económico</i>	52

2.6.1 Valor Actual Neto	53
2.6.2 Tasa interna de retorno	53
2.6.3 Tiempo de recuperación de la inversión	53
2.7 Evaluación del confort térmico	54
Capítulo 3: Estrategia de mitigación energética en la climatización	55
3.1 Estrategias de mitigación energética	56
3.1.1 Orientación de la habitación	56
3.1.2 Enfoque adaptativo	56
3.1.3 Reflectancia	57
3.1.4 Efecto de la ventana: tipo de ventana y proporción ventana-pared	57
3.1.5 Sombreado	59
3.1.6 Propiedades termo-físicas de los materiales	60
3.1.7 Vegetación	60
3.1.8 Casos de estudio	61
3.2 Construcción de la plataforma de simulación	62
3.2.1 Edificio de referencia con tres zonas	62
3.2.2 Acoplamiento de la habitación en el edificio de referencia	62
3.2.3 Verificación de la plataforma de simulación	63
Capítulo 4: Resultados y análisis	65
4.1 Desempeño térmico de las estrategias de mitigación energética	66
4.1.1 Orientación	66
4.1.2 Enfoque adaptativo	67
4.1.3 Reflectancia	68
4.1.4 Efecto de ventanas	69
4.1.5 Sombreado	71
4.1.6 Propiedades termo físicas de los materiales	72
4.1.7 Vegetación	73
4.1.8 Análisis de todas las estrategias	74
4.1.9 Comparativo de cargas térmicas con las diferentes estrategias de mitigación energética	75
4.2 Factibilidad de climatización hacia cero energías convencionales	77
4.2.1 Modificación de la habitación climatizada con estrategias de mitigación	77
4.2.2 Evaluación económica de la habitación diseñada con EM	79
4.2.3 Evaluación del confort térmico PMV/PPD	82
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros	83
5.1 Conclusiones	84
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros	85
Bibliografía	86

Lista de Figuras

Figura		Pág.
2.1	<i>Ángulo cenital, pendiente, ángulo acimutal de superficie y ángulo acimutal solar para una superficie inclinada.</i>	25
2.2	<i>Teorías del confort térmico y parámetros físicos.</i>	28
2.3	<i>Rangos aceptables de la humedad relativa para el confort térmico.</i>	29
2.4	<i>Balance térmico en el cuerpo humano.</i>	31
2.5	<i>Parámetros de entrada del PMV.</i>	32
2.6	<i>PPD en función del PMV.</i>	34
2.7	<i>Principios básicos de los materiales fríos.</i>	38
2.8	<i>Edificio de referencia.</i>	41
2.9	<i>Configuración de la edificación de estudio, a) zonas térmicas y b) fachadas.</i>	43
2.10	<i>Carga térmica de enfriamiento de las distintas zonas del edificio de referencia, para la ciudad de Monterrey.</i>	43
2.11	<i>Metodología de la localidad de estudio.</i>	44
2.12	<i>Temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa de a) Monterrey y b) Coatzacoalcos.</i>	46
2.13	<i>Formación de un microclima en una edificación.</i>	48
2.14	<i>Optimización de habitación climatizada con el mínimo de energías convencionales.</i>	51
2.15	<i>Metodología para determinar el comparativo económico.</i>	52
2.16	<i>Evaluación del confort térmico.</i>	54
3.1	<i>Diagrama del programa de evaluación de las cargas térmicas.</i>	62
3.2	<i>Diagrama del programa de evaluación, considerando las 12 zonas térmicas.</i>	63
3.3	<i>Comparativo de las cargas térmicas variando la reflectancia de 0.1-0.9 para Monterrey.</i>	64
4.1	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando la orientación de la habitación de estudio en Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	66
4.2	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando modelos de confort térmico adaptativo, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	67
4.3	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando la reflectancia de 0.1-0.9 para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	68
4.4	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando el tipo de ventanas, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	69
4.5	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando el porcentaje WWR, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	70

Lista de Figuras (continuación)

Figura		Pág.
4.6	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro, añadiendo sombreado en las ventanas sur y oeste, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	71
4.7	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro, cambiando los materiales de construcción, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	72
4.8	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro MWh-año, cambiando la vegetación en paredes y techo, en las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	73
4.9	<i>Ahorros de la carga de enfriamiento anual por estrategia pasiva en MWh-año para la ciudad de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	74
4.10	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro en MWh, con las diferentes estrategias de mitigación energéticas en Coatzacoalcos.</i>	75
4.11	<i>Carga térmica de enfriamiento y ahorro en MWh, con las diferentes estrategias de mitigación energéticas en Monterrey.</i>	76
4.12	<i>Cargas térmicas de enfriamiento mensuales (MWh); a) Caso A, B y C para Monterrey; b) Caso A, D y E para Monterrey; c) Caso A, B y C para Coatzacoalcos y d) Caso A, D y E para Coatzacoalcos.</i>	78

Lista de Tablas

<i>Tabla</i>		<i>Pág.</i>
2.1	<i>Descripción de las subrutinas utilizadas en el programa de simulación.</i>	27
2.2	<i>Factor de ropa para distintas vestimentas.</i>	30
2.3	<i>Tasa metabólica a diferentes actividades.</i>	31
2.4	<i>Sensación térmica en función del PMV.</i>	33
2.5	<i>Modelos de confort térmico adaptativo y parámetros de confort térmico en edificaciones.</i>	36
2.6	<i>Estrategias de mitigación.</i>	37
2.7	<i>Reflectancia de distintas superficies.</i>	39
2.8	<i>Descripción de los parámetros de entrada para la edificación de referencia.</i>	41
2.9	<i>Materiales de construcción, dimensiones y propiedades termo-físicas.</i>	42
2.10	<i>Zonas térmicas del edificio de referencia.</i>	43
2.11	<i>Cargas térmicas por metro cuadrado en distintas zonas de México.</i>	44
2.12	<i>Estados de la República Mexicana con mayor potencial de enfriamiento y consumo eléctrico.</i>	45
2.13	<i>Selección de la ciudad de estudio del estado de Nuevo León.</i>	45
2.14	<i>Selección de la ciudad de estudio del estado de Veracruz.</i>	45
2.15	<i>Parámetros climáticos de la ciudad de Monterrey.</i>	46
2.16	<i>Parámetros climáticos de la ciudad de Coatzacoalcos.</i>	47
3.1	<i>Modelos de confort térmico adaptativo.</i>	56
3.2	<i>Tipos de ventanas.</i>	58
3.3	<i>Proporción ventana-pared y área de acristalamiento.</i>	59
3.4	<i>Propiedades termo-físicas de los materiales.</i>	60
3.5	<i>Combinaciones de materiales para pared y techo.</i>	60
3.6	<i>Propiedades de los materiales para cubierta convencional y cubierta verde.</i>	61
3.7	<i>Estrategias de mitigación utilizadas para los casos de estudio.</i>	61
3.8	<i>Comparativo de la carga térmica de enfriamiento anual con lo reportado y el presente trabajo, para diferentes ciudades de México.</i>	64
4.1	<i>Materiales de construcción utilizados.</i>	72
4.2	<i>Ahorro en la carga térmica de enfriamiento MWh-año por estrategia.</i>	74
4.3	<i>Combinación de las estrategias de mitigación utilizadas para los casos de estudio.</i>	77
4.4	<i>Carga térmica anual de los casos de estudio para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.</i>	78

Lista de Tablas (continuación)

<i>Tabla</i>		<i>Pág.</i>
4.5	<i>Comparación de los costos de inversión de la habitación convencional y la habitación con EM para determinar los ahorros económicos.</i>	79
4.6	<i>Tabulación de la progresión anual de los costos de energía eléctrica y su valor actual para la ciudad de Coatzacoalcos.</i>	80
4.7	<i>Tabulación de la progresión anual de los costos de energía eléctrica y su valor actual para la ciudad de Monterrey.</i>	81
4.8	<i>Sensación térmica y porcentaje de personas insatisfechas mensualmente, para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey.</i>	82

Nomenclatura

Variable	Descripción	Unidades
A	Área expuesta al flujo de calor	m^2
ΔT	Diferencia de temperatura	$^{\circ}C$
d_s	Tasa de descuento	%
f_{cl}	Factor de superficie de la ropa	Clo
f_t	Flujo de caja	\$
$f_{(j-1)}$	Flujo de caja acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión	\$
Valor-U	Coefficiente global de transferencia de calor	$W/m^2 \cdot K$
h_{conv}	Coefficiente convectivo de transferencia de calor	$W/m^2 \cdot K$
HR	Humedad relativa	%
I_{cl}	Aislamiento de la ropa	$W/m^2 \cdot K$
I_0	Inversión inicial	I_0
k	Conductividad térmica del material	$W/m \cdot K$
N	Periodos de inversión	año
$N_{(N-1)}$	Periodo inmediato anterior en el que se recupera la inversión	año
P_a	Presión parcial de vapor de agua	Pa
Q_{cond}	Flujo de calor por conducción	MWh
Q_{rad}	Flujo de calor por radiación	MWh
Q_{conv}	Flujo de calor por convección	MWh
Q_T	Carga térmica	MWh
Q_{TR}	Carga térmica de referencia	MWh
Q_{TEi}	Carga térmica de estrategia	MWh
Q_{sol}	Ganancias por flujo de calor solar	MWh
Q_{alm}	Energía almacenada en la edificación	MWh
R_{dir}	Radiación directa	W/m^2
R_{ref}	Radiación reflejada	W/m^2
R_{dif}	Radiación difusa	W/m^2
R_c	Radiación de onda corta absorbida	W/m^2
SHGC	Ganancia de calor solar	-
T_s	Temperatura de la superficie	$^{\circ}C$
T_{cl}	Temperatura de la superficie de la ropa	$^{\circ}C$
T_{∞}	Temperatura del fluido	$^{\circ}C$
T_{room}	Temperatura de la habitación	$^{\circ}C$

Nomenclatura (continuación)

<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
T_a	Temperatura del aire	°C
T_{sa}	Temperatura seca del aire	°C
T_{conf}	Temperatura de confort	°C
T_{amb}	Temperatura ambiente	°C
T_{env}	Temperatura de la envolvente	°C
T_{rm}	Temperatura radiante media	°C
T_{sky}	Temperatura del cielo	°C
T_{globo}	Temperatura del globo	°C
TIR	Tasa interna de retorno	%
TR	Tiempo de recuperación de la inversión	año
VAN	Valor actual neto	\$
V_{ar}	Velocidad del aire	m/s
W	Potencia mecánica efectiva	W/m ²
WWR	Proporción ventana-pared	%
ρ	Reflectancia	-
γ_s	Ángulo acimut de la superficie	-
σ	Constante de Stefan- Boltzmann	W/m ² ·K ⁴
ε	Emisividad	-

Acrónimos y siglas

Acrónimo/ Descripción sigla

AC	<i>Aire acondicionado.</i>
ASHRAE	<i>Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado.</i>
CIBSE	<i>Institución colegiada de ingenieros de servicios de construcción .</i>
CONUEE	<i>Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.</i>
EM	<i>Estrategia de mitigación.</i>
GDMTO	<i>Gran Demanda de Media Tensión Ordinaria.</i>
GR	<i>Techos verdes.</i>
ISO	<i>Organización internacional de estandarización.</i>
M	<i>Material.</i>
PPD	<i>Porcentaje de personas insatisfechas.</i>
PMV	<i>Voto medio predicho.</i>
RITE	<i>Reglamento de instalaciones térmicas de edificios.</i>
PT	<i>Combinación pared/techo.</i>
SENER	<i>Secretaría de Energía.</i>
TR	<i>Techo tradicional.</i>
VN	<i>Ventilación natural.</i>
V	<i>Tipo de ventana.</i>
VS	<i>Ventana con sombreado.</i>

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio de la factibilidad de diseñar una habitación climatizada hacia cero energías convencionales considerando el enfoque adaptativo, en términos de las cargas térmicas de enfriamiento y los costos asociados. La habitación, se considera tomando en cuenta un edificio de hospital ubicada en una zona representativa de la República Mexicana, en lo que respecta al costo de climatización, número de habitantes, el PIB, consumo energético, y en general por su considerable consumo de energía en la refrigeración. La habitación se definió considerando la norma mexicana NOM-008-ENER-2001 (referente a eficiencia energética de edificios no-residenciales) y a la NOM-016-SSA3-2012 (referente a infraestructura y equipamiento de hospitales y consultorios de atención médica especializada). Las ciudades consideradas para el estudio son Coahuila de Zaragoza y Monterrey, la información climática de las ciudades se obtuvo de la base de datos de Meteoronorm V7.1. La factibilidad del uso de las estrategias de mitigación energética se determina con un comparativo térmico y económico tomando como referencia a una habitación climatizada convencionalmente en el contexto de la NOM-008-ENER-2001. El estudio térmico consistió en determinar las cargas térmicas con el programa de simulación TRNSYS y el estudio económico mediante indicadores para evaluar la viabilidad de la inversión. Los ahorros térmicos se determinan en referencia al cumplimiento de la norma NOM-008-ENER-2001, a una temperatura de 25.0°C , orientación de la habitación hacia el sur, la reflectancia de techos y paredes de 0.3, ventana con un vidrio claro 4 mm, proporción ventana-pared de 40%, con paredes de ladrillo y de techo concreto. Para el diseño de la habitación se consideraron estrategias de mitigación de consumo energético, las cuales fueron seleccionadas por su potencial en el ahorro de las cargas térmicas de acuerdo a la literatura. Las estrategias de mitigación consideradas para el comparativo térmico y económico fueron; el enfoque adaptativo (modelo de Guía A de CIBSE), la orientación (90°C), tipo de ventana (low-SHGC-Ar Gold), *WWR* (10%) y la reflectancia (0.8). Los resultados mostraron que, para la habitación convencional tipo hospital, se requiere una carga térmica de enfriamiento de 72.17 y 88.04 *MWh-año*, mientras que para la habitación diseñada con estrategias de mitigación y el enfoque adaptativo se requiere una carga de enfriamiento de 26.20 y 29.35 *MWh-año* con un ahorro anual de 45.97 y 58.69 *MWh* representando el 64-67%, para Monterrey y Coahuila de Zaragoza, respectivamente. En términos económicos, considerar el enfoque adaptativo

y las estrategias de mitigación energética, resulta viable para las ciudades de Monterrey y Coahuila de Zaragoza presentando; una *TIR* de 32-42%, lo que indica que es rentable; un *VAN* total de \$315,826.61 y \$441,325.28 ($VAN > 0$) lo que indica que el proyecto generará beneficios; y un periodo de recuperación de la inversión de 3.15 y 2.36 años, respectivamente. Además, considerando el confort térmico de la habitación, se observó que la sensación térmica se mantuvo en intervalos neutros en la mayoría de los meses y en un porcentaje de personas insatisfechas menor al 10%, a excepción de los meses de abril, noviembre y diciembre, en donde se presentó una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido y de fresco a frío.

Capítulo 1

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se presenta la motivación, la revisión bibliográfica, los objetivos, los alcances y la estructura de la tesis. La revisión bibliográfica se dividió en; el diseño de edificios de bajo o nulo consumo de energía convencional, el ahorro en la carga térmica de enfriamiento implementando estrategias de mitigación energética, parámetros de confort utilizando el enfoque adaptativo y la optimización energética en edificaciones considerando el enfoque adaptativo.

1.1 Motivación

El diseño de edificios con mínimo consumo de energía convencional ha venido surgiendo como una estrategia en la búsqueda de nuevas alternativas para mitigar el cambio climático, ya que en general, las personas pasan más del 80% de su tiempo en una edificación, (Zhibin, 2019). Hoy en día, se estima que en promedio las edificaciones consumen más del 30% de la demanda de energía en todo el mundo según la agencia internacional de energía (IEA, 2019). El concepto de edificaciones cero energías ya no se perciben más como un concepto de futuro, ahora se percibe como una solución para la mitigación de las emisiones de CO_2 y/o para la reducción del uso de energías convencionales (Marszal *et al.*, 2011). En climas cálidos, las estrategias que se han venido desarrollando y el diseño de edificaciones bioclimáticas son limitadas, esto se debe a que los estudios generalmente atienden casos de climas de latitudes altas (Marszal *et al.*, 2011). Así, en localidades con climas cálidos, el desarrollo de estándares, códigos de construcción y trabajos demostrativos aún son escasos o nulos en general.

Por otro lado, el mejoramiento del ahorro y uso eficiente de la energía en el confort térmico de los ocupantes en edificaciones es una alternativa para coadyuvar a disminuir el consumo energético. En general, el ahorro energético y el confort térmico en edificaciones son variables que parecen ser antagónicas, ya que el ahorro de la energía puede limitar el desempeño del sistema de climatización y generar disconformidad en los usuarios (Arballo *et al.*, 2016). El 70% de la energía demandada en las edificaciones la consumen los sistemas de aire acondicionado (Zhibin *et al.*, 2019). Una real mejora de calidad de vida implica de manera conjunta lograr mejores condiciones de confort y significativos ahorros de energía que conlleven a mitigar emisiones de contaminantes (Chenari *et al.*, 2016). Los modelos de confort adaptativo se han observado como una acción conjunta que permite mitigar el consumo energético en la climatización de edificaciones y lograr aceptación térmica. López *et al.* (2017) reportan que es posible incrementar el confort a la vez de reducir el consumo energético e impacto ambiental.

La selección de estrategias de enfriamiento pasivo combinando el uso del enfoque adaptativo para edificios no residenciales, en algunos casos ha llevado a lograr bajos consumos de energía convencional en las edificaciones, (Attia y Carlucci, 2015), dando mayor énfasis en

alternativas con bajo o nulo consumo de energía (Oropeza *et al.*, 2019) y en el uso de energías renovables. El diseño bioclimático o pasivo considera las características específicas del sitio y del clima para usarlas a favor de la edificación. Hoy en día, en el diseño de edificaciones se ha buscado integrar estrategias de climatización pasiva en edificaciones nuevas y en remodelación de construcciones en la mayor parte del mundo, sin embargo, la mayor parte de los trabajos corresponden a zonas con climas diferentes a los cálidos (Semahi *et al.*, 2019; Marín *et al.*, 2016). El estudio de edificaciones cero energías en climas cálidos es limitada y su factibilidad en muchos casos es incierta aún en edificaciones que se consideran como referentes normativos, más aún, el efecto del ahorro de energía y el mejoramiento del confort térmico al considerar el enfoque adaptativo es incierto. Para esto, es necesario dar mayor certidumbre a las edificaciones climatizadas con estrategias de mitigación energética, con ejemplos de estudios del desempeño térmico de edificaciones para referencias normativas, como una alternativa para impulsar su desarrollo, buscando entornos saludables, accesibles y sostenibles.

1.2 Revisión bibliográfica

En esta sección se presenta la revisión bibliográfica, relacionada con; el diseño de edificios de bajo o nulo consumo de energía convencional, el ahorro en la carga térmica de enfriamiento implementando estrategias de mitigación energética, parámetros de confort térmico utilizando el enfoque adaptativo y la optimización energética en edificaciones considerando el enfoque adaptativo.

1.2.1 Diseño de edificios de bajo o nulo consumo de energía convencional

Osmani y O'Reilly (2009) realizaron un estudio teórico y métodos de investigación cuantitativos y cualitativos, para presentar la viabilidad de construir viviendas con cero emisiones de carbono. Los autores seleccionaron empresas constructoras en Inglaterra para realizar encuestas y facilitar la planificación y aplicación de estrategias de cero energías en sus proyectos, con una población de los 100 mejores constructores de casas en Inglaterra. El cuestionario se diseñó en torno a los resultados del estudio teórico, para establecer una perspectiva general de la industria de la construcción de viviendas, en general sobre las prácticas actuales de construcción de viviendas de bajo consumo energético. Los autores concluyeron que existe la necesidad de un enfoque conjunto e integral del objetivo de cero emisiones de carbono. En el estudio se encontró que las viviendas cero emisiones de carbono, son técnicamente factibles a largo plazo y requieren acciones tanto del gobierno como de la industria para poder lograr la aplicación.

Rojas *et al.* (2010) presentaron un estudio de los trabajos desarrollados en el Centro de Investigación en Energía (CIE) de la UNAM, para demostrar el ahorro de energía en las edificaciones, además, presentaron recomendaciones para mejorar el confort térmico. Los autores utilizaron modelos a escala y emplearon diversas técnicas experimentales como son; la Schlieren para visualizar gradientes de densidad y velocimetría, y termopares para medir temperaturas. Para las simulaciones numéricas desarrollaron códigos propios y utilizaron programas comerciales. Los autores construyeron una casa en la que aumentó en un 50% el tiempo de confort térmico y en la climatización el ahorro de energía para enfriamiento fue del 50%. Además, realizaron estudios para mejorar la sustentabilidad de casas monolíticas de concreto, propusieron mejoras en el diseño y en los materiales. Los autores presentaron

diferentes combinaciones de estrategias de diseño en los edificios, en los diferentes tipos de clima de la República Mexicana, para alcanzar en el interior confort térmico. Es de observarse, que es posible aumentar el confort térmico al mismo tiempo de ahorrar energía en la climatización, mediante estrategias en el diseño de la casa.

Castillo *et al.* (2011) presentan una metodología para evaluar la calificación de las viviendas que utilizan sistemas pasivos para la climatización. El estudio se enfoca en viviendas con clima cálido subhúmedo en la zona de Temixco. Los sistemas pasivos considerados fueron; la orientación, ventilación, color de la superficie exterior de techos, color de superficie exterior de muros, altura interior, distribución de áreas, porcentaje de área ocupada, número de niveles, piso exterior, vegetación y árboles. En la evaluación, el porcentaje de calificación se determina del 0-100%. La calificación para el piso exterior en el predio es de 85%, color de muros de 83%, porcentaje de área ocupada presenta un 65% y color de la superficie exterior del techo del 53%. En cuatro rubros de orientación a la radiación, distribución de áreas, material en andadores y uso de vegetación y árboles, la calificación de adecuado llegó a ser hasta del 20% en la vivienda de muestra.

Eshraghi *et al.* (2014) estudiaron la factibilidad del diseño de un edificio cero energías convencionales, en una casa típica en Teherán. La casa la diseñaron para un clima cálido y una familia de cuatro miembros. Las cargas térmicas de la casa las determinaron con datos meteorológicos de un año típico. La masa térmica, y el muro Trombe se utilizaron como estrategias pasivas centrales para reducir las cargas de calefacción y refrigeración. Los autores utilizaron bombas de calor de absorción solar para satisfacer la demanda de calefacción y agua caliente. Los paneles fotovoltaicos los utilizaron para generar electricidad, la cual se almacenó en baterías. La casa cero energías la compararon con una casa convencional, para el análisis económico. El excedente de electricidad fue vendida a la red por lo cual se considera como un beneficio. Los autores concluyeron que la masa térmica y el muro Trombe desempeñan un papel importante en la reducción de la carga doméstica, los cuales son métodos pasivos y puede reducir hasta un 42% en la carga energética.

Perlova *et al.* (2015) realizaron un diseño y previa construcción de un edificio con un consumo energético cercano a cero, con un enfoque integrado de diseño totalmente autónomo a las construcciones urbanas. En la fase operativa se realizó la monitorización de la energía

de los edificios, la evaluación de las características termo-físicas de los muros y la determinación de los valores reales del consumo de energía. El nivel del aislamiento térmico y el revestimiento se consideró para el diseño del edificio. El sistema de aire acondicionado que consideraron es de bajo consumo de energía, con alta fiabilidad y facilidad de manejo. Para los sistemas de ventilación, utilizaron bombas de calor geotérmicas. Los autores concluyen que el diseño tiene un impacto significativo en el consumo de energía de edificios. Para mejorar la eficiencia energética del edificio sugirieron técnicas de arquitectura como la orientación óptima del edificio, el nivel de aislamiento térmico y acristalamiento en las fachadas entre otros.

Hsieh *et al.* (2018) estudiaron los efectos del enfriamiento por sombreado y transpiración mediante la caracterización de las propiedades de un árbol. El estudio experimental se realizó en la ciudad de Nanjing China, en la zona subtropical, la simulación se realizó en el software de simulación EnergyPlus. La cuantificación de la influencia de los árboles en el ahorro de energía se desarrolló en cuatro escenarios; el escenario uno, sin árboles; el escenario dos, con los árboles existentes en la ciudad; el escenario tres, con más sombra de los árboles y el escenario cuatro, con más transpiración de árboles. Los resultados de la simulación mostraron que, en comparación con el escenario uno, el escenario dos puede reducir el uso de energía del edificio en un 10.3% debido a los beneficios de la sombra y la transpiración de los árboles existentes. El escenario tres y cuatro, pueden reducir el uso de energía del edificio en un 15.2% y 12.4%, respectivamente, en comparación con el escenario uno. Es de observar que el uso de árboles es una estrategia que ayuda a reducir el uso de energía en edificios.

Ran y Tang (2018) desarrollaron una metodología para analizar el efecto combinado de tres estrategias para el enfriamiento pasivo, las cuales fueron; techo verde, paredes aisladas y ventilación nocturna, en regiones calientes y húmedas de la ciudad de Shangai. La simulación se realizó en el software DesignBuilder, en donde se determinó el ahorro de energía y la mejora del confort térmico. El edificio fue orientado al sur, cuenta con un solo piso, la planta del techo verde es *Sedum lineare*, con 10-15 cm de alto. En el estudio se observó, que el techo verde redujo significativamente la temperatura del aire interior de 34.4°C a 30.0°C. Además, con la ventilación nocturna se logró disminuir 1.5°C y con la implementación de las paredes aisladas, la temperatura disminuyó 2.3°C. Por lo tanto, el uso de ventilación nocturna y

aislamiento de paredes puede ayudar efectivamente al techo verde a reducir la temperatura y mejorar el ambiente térmico interior. También, se observa que la integración de dos o más estrategias para el enfriamiento pasivo, ayudan a mantener temperaturas más bajas y poder alcanzar la mejora del confort térmico en regiones cálidas.

Bhamare *et al.* (2019) evaluaron diferentes técnicas de enfriamiento pasivo para la construcción y aplicación en diferentes zonas climáticas. Las técnicas de enfriamiento pasivo se clasificaron de acuerdo con; la protección de ganancia de calor, modulación de la ganancia de calor solar y rechazo o disipación de la ganancia de calor. Los autores mencionaron técnicas de enfriamiento pasivo como son; vegetación estratégica, estanque en el techo, control solar, control de apertura, acristalamiento, masa térmica, enfriamiento nocturno, disipador de calor, entre otras. En el estudio se observó una revisión detallada relacionada con las técnicas de enfriamiento pasivo para la aplicación en edificios. Además, la selección de la técnica de enfriamiento pasivo adecuada es una tarea importante, ya que depende de las condiciones climáticas, las limitaciones de espacio del edificio y el rendimiento de la técnica pasiva.

Oropeza (2019) evaluó el rendimiento y la efectividad de diferentes métodos pasivos de calefacción y refrigeración para edificios en términos de la temperatura interior, clasificando los métodos como operables, semi-operables y no operables. El estudio se realizó para una vivienda típica de la CDMX, con materiales comunes en el lugar, utilizando simulación en EnergyPlus. Los resultados muestran que ocho de los catorce métodos pasivos evaluados, no logran una efectividad mínima para considerarse un método correcto para el confort térmico. También, se observa, que de los seis métodos que sí cumplen con la efectividad, dos de ellos no requieren operación, es el caso de tecnología con material de cambio de fase y la que utiliza tecnología de materiales con la capacidad térmica. Estos dos métodos son efectivos ya que, una vez instalados, no requieren de operación continua. En el estudio se observó que los métodos pasivos pueden reducir a poco menos del 10% el consumo energético con tecnologías convencionales, ya que se logró reducir de 1990 a 1802 *kWh/año*. También, se observó que las tecnologías controladas por los usuarios son las que mayormente impactan la reducción del consumo de energía.

Yang *et al.* (2020) estudiaron el confort térmico y las estrategias de diseño que responden al clima en áreas secas, calientes y frías, para fomentar el diseño arquitectónico en términos del ambiente térmico interior con estrategias de mitigación energéticas. Los autores realizaron encuestas y mediciones de campo, para evaluar la respuesta subjetiva de los residentes locales en entorno térmico de edificios vernáculos. La encuesta se realizó en diez aldeas de áreas suburbanas de China, con un conjunto de datos válidos de 249, 516 y 282 para las estaciones de primavera, verano e invierno, respectivamente, con sujetos de 20 a 60 años. La temperatura del aire interior en el semisótano era de alrededor de 31°C, mientras que la temperatura exterior exhibía una variación de 28.6 a 44.3°C. Los autores mencionan que los patrones de construcción basados en el comportamiento adaptativo ayudan a mejorar el ambiente térmico interior. En el estudio se observó que se puede proporcionar nuevas ideas para el diseño de edificios con bajo consumo de energía en zonas cálidas y frías.

El diseño de una habitación climatizada con mínimo consumo de energía convencional para un clima cálido, está en función de la estrategia de mitigación adecuada, ya que depende de las condiciones climáticas, las limitaciones de espacio y el rendimiento de la estrategia (Bhamare *et al.*, 2019). La orientación óptima del edificio, el nivel de aislamiento térmico, acristalamiento, la masa térmica, ventilación nocturna, techo verde y aislamiento de paredes, son algunas de las estrategias pasivas para la climatización de edificios que ayudan a disminuir de un 10-42% la carga energética de un edificio (Eshraghi *et al.*, 2014; Perlova *et al.*, 2015; Ran y Tang, 2018; Oropeza *et al.*, 2019 y Hsieh *et al.*, 2018). Además, se observó que las estrategias de construcción controladas por los usuarios impactan en la reducción del consumo de energía y ayudan a mejorar el ambiente térmico interior (Yang *et al.*, 2020; Oropeza, 2019). Por otra parte, el acristalamiento en las edificaciones se convierte en una fuente de calor radiante al transmitir y emitir radiación. Por lo tanto, la provisión de sombra es necesaria para evitar molestias térmicas y visuales. También, se observa que la integración de dos o más estrategias de diseño pasivo, ayudan a mantener temperaturas más bajas en el interior y poder alcanzar la mejora del confort térmico (Ran y Tang, 2018; Rojas *et al.*, 2010).

1.2.2 Ahorro en la carga térmica de enfriamiento implementando estrategias de mitigación energética

Synnefa *et al.* (2007) evaluaron el ahorro de energía y el impacto en el confort térmico del uso de recubrimientos de techos fríos en edificios residenciales en diversas condiciones climáticas. El edificio base utilizado en la simulación es una casa de un solo piso y techo plano con un área de techo de 100 m^2 . Los autores eligieron las temperaturas según la norma ASHRAE 55 1992 que se encuentran en un rango de $23.3\text{-}27.7^\circ\text{C}$. Las simulaciones se realizaron para 27 ciudades de todo el mundo que representan diferentes condiciones climáticas con datos tomados de METEONORM. La simulación térmica de la edificación se realizó con TRNSYS. El aumento en la reflectancia solar del techo en 0.65 reduce las cargas de enfriamiento en $8\text{-}48\text{ kWh/m}^2\text{-día}$. Los autores mostraron que se puede lograr ahorros energéticos que varían entre $10\text{-}27\%$ según las condiciones climáticas. Es de observarse que aumentar la reflectancia solar de un techo suele ser más beneficioso en climas cálidos en donde la carga de refrigeración domina la mayor parte del año. Este tipo de método pasivo ayuda a contribuir a la reducción de las cargas de enfriamiento en los edificios con aire acondicionado y a mejorar las condiciones de confort térmico en interiores al disminuir las horas de incomodidad.

Tzempelikos y Athienitis (2007) calcularon el impacto del diseño de un edificio, considerando el área de acristalamiento y el control de sombreado en la demanda de iluminación y refrigeración. Los autores evaluaron el uso de energía de refrigeración e iluminación, en espacios perimetrales en función de la relación ventana-pared y los parámetros de sombreado. En los resultados, observaron que el control de sombreado tiene el mayor impacto en la demanda anual de energía de refrigeración, reduce un 50% (de 4060 MJ-año a 2054 MJ-año) en comparación con el control de iluminación activo sin sombreado. Además, el control de iluminación de encendido/apagado automático, da como resultado una reducción del 77% en la demanda de electricidad para iluminación y una reducción del 16% en la demanda anual de refrigeración, para una relación de ventana-pared del 30% . Es de observarse, que el uso de este tipo de alternativas ayuda a disminuir la demanda anual de energía en porcentajes considerables, es por ello que el diseño se debe considerar durante la etapa inicial ya que las decisiones tendrán un impacto importante en el rendimiento energético durante la vida útil del edificio.

Wang *et al.* (2009) realizaron un estudio para demostrar la viabilidad del diseño de una casa cero energías con sistemas pasivos y proporcionar métodos de optimización específicos para lograr el diseño de casas con energía cero. El estudio se realizó en Reino Unido, comparando el diseño con edificios convencionales, las simulaciones se realizaron con EnergyPlus y TRNSYS para el estudio de la envolvente y para el análisis de eficiencia energética. En comparación con el diseño de la casa original, el ahorro de energía en calefacción con una guía de diseño óptima es aproximadamente un 26.5% de reducción de los requisitos de calefacción originales y se observó que hay un aumento en la energía de refrigeración anual de 8.3 kWh a 61.1 kWh. El valor- U para el acristalamiento se mejoró de 1.8 a 1.37 W/m^2K , lo que resultó en una reducción de 55.6 y de 33.3 kWh en la calefacción y refrigeración, respectivamente, mientras que al reducir el valor U en el techo de 4.3 a 0.2 W/m^2K , reduce las cargas anuales de calefacción y refrigeración 197.2 y 8.3 kWh, respectivamente. Es de observarse que el diseño óptimo del edificio y la aplicación de estrategias de mitigación energética minimizan el requerimiento energético en la demanda térmica de calentamiento y enfriamiento.

Chagolla *et al.* (2012) realizaron un estudio para visualizar el efecto de la sombra de los árboles en la temperatura del aire interior sin aire acondicionado y en las cargas térmicas para aire acondicionado. El estudio se realizó para una vivienda con clima cálido en México, utilizando simulación en EnergyPlus. El sombreado del árbol se analizó con dos diferentes geometrías, el árbol con follaje y el árbol como cubierta plana. Los resultados mostraron que la diferencia máxima para ambas geometrías fue de 0.6°C y las temperaturas simuladas para la casa sin sombra fueron hasta 4°C superiores a las medidas en la casa con sombra de los árboles. En el estudio se observó que existen ahorros de energía en las cargas térmicas anuales del aire acondicionado por efectos del sombreado de los árboles del 76.6%. Los autores concluyeron que la sombra en los árboles puede disminuir la temperatura del aire interior, al mismo tiempo de lograr un confort térmico o acercarse a él en casas sin aire acondicionado. Por otro parte, para las casas con aire acondicionado, la sombra de los árboles puede ahorrar un gran porcentaje de energía de enfriamiento.

Chagolla (2012) realizó un estudio de la demanda energética para proponer mejoras en las condiciones del confort térmico, contemplando cambios en la envolvente para viviendas del

estado de Morelos. El estudio lo realizó mediante simulación térmica en dos viviendas, analizando clima cálido, templado y frío. La simulación la realizó en TRNSYS, variando parámetros que influyen en el comportamiento térmico de las viviendas. El autor encontró que es posible reducir las cargas térmicas, en un 85%, 93% y en 93% para un clima cálido, templado y frío, respectivamente, mejorando las condiciones de la envolvente. En el estudio se observó que los factores que tuvieron mayor influencia para los climas cálidos y templados fueron; el color, adición de aislante en muros y orientación, mientras que para climas fríos impacta más la adición de aislante en los muros, ventanas de doble panel y la orientación. También, se observa que se pueden lograr reducciones de temperatura de 9.8°C para climas cálidos y templados y aumentar la temperatura 10.2°C para climas fríos cambiando la configuración de la envolvente.

Giraldo (2017) evaluó, analizó y propuso soluciones con métodos pasivos para mejorar el comportamiento térmico e incrementar la tasa de ventilación natural en las viviendas de interés social VIS, de Cali. El autor establece, como caso de referencia un cuarto con cubierta de teja de fibrocemento, este se comparó con dos cuartos de condiciones similares, en los que se implementaron Chimeneas solares y otras estrategias pasivas. En los resultados se observó que la tasa de ventilación se incrementó de 0.0 a 0.95 m/s con una chimenea en lámina metálica pintada de negro, una altura de 2 m y una sección transversal de $0.15 \times 1.4\text{ m}$, mientras que se presentaba una radiación solar de 847 W/m^2 , alcanzando una temperatura de aire al interior de la chimenea de 81°C y mientras que el interior se encontraba a 29°C . Además, junto a las demás estrategias se logró mejorar el confort en un promedio cercano al 80%. Es de observarse que, aun teniendo un presupuesto limitado, es posible adoptar estrategias que disminuyen la carga térmica. Considerando los sistemas pasivos en el módulo de prueba, el costo final fue de \$270, valor semejante al de un ventilador en Cali, valor que representa una fracción poco considerable del valor de la instalación de un aire acondicionado.

Álvarez *et al.* (2014) reportaron la evaluación del uso de techos frescos en el consumo energético y el ahorro de energía en edificaciones no residenciales y residenciales en México por medio de la NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011, incluyendo los niveles de aislamiento dados por los coeficientes de transferencia de calor globales del techo. Para las

simulaciones utilizaron los programas DesignBuilder y EnergyPlus. Las ciudades evaluadas, se consideraron, tomando en cuenta los climas más representativos de la República Mexicana. El efecto de los techos frescos se determinó cambiando la reflectancia. Los autores concluyeron que los ahorros de energía de enfriamiento fueron mayores en climas cálidos y secos, mientras que, los climas templados no muestran ahorros significativos. Para los climas secos y cálidos los ahorros fueron significativos. Para las ciudades de Mérida y Monterrey, ubicadas en climas cálidos, se calcularon ahorros de 1.6 *TWh* y se mitigaron 1, 154,000 toneladas de *CO*₂.

Taleb (2014) estudió la aplicación de ocho diferentes estrategias de enfriamiento pasivo para mejorar el rendimiento térmico y reducir el consumo de energía. El estudio se realizó para un edificio residencial de Dubái en un clima cálido, con simulaciones en el software IES. Las estrategias pasivas utilizadas fueron; (alta reflexión solar, doble acristalamiento, techo verde, colectores de viento, dispositivos de sombreado, aislamiento, enfriamiento evaporativo y enfriamiento radiante indirecto). El análisis muestra que existe un potencial para reducir la carga de enfriamiento en un 9% después de aplicar el enfriamiento pasivo mientras que el consumo de energía puede reducirse en un 23.6%. En el estudio se observó que el diseño pasivo depende de las condiciones climáticas y del área, además, las temperaturas alcanzadas por el uso de estas estrategias se encuentran dentro de la zona de confort térmico.

Marin *et al.* (2016) estudiaron el ahorro de energía debido al uso de materiales de cambio de fase (*PCM*) como sistema pasivo de climatización, en el interior de edificios reubicables. La simulación se realizó en EnergyPlus mediante diferencias finitas con una discretización totalmente implícita, para diferentes condiciones climáticas. El estudio se realizó para una edificación con un área de 5.76 *m*² de superficie con 1 *m*² de acristalamiento y 1.6 *m*² de puerta, ubicada en la pared norte. Además, todas las paredes exteriores y el techo estaban expuestas al ambiente exterior, también las paredes estaban pintadas en gris para mejorar la absorción solar, y el piso exterior separado del suelo. Los efectos de los *PCM* se estudiaron mediante prototipos de construcción simulando una placa de yeso llena con 18% de las microcápsulas *PCM* de Micronal. En el estudio se observó que el rendimiento de *PCM* en los edificios depende mucho de las condiciones climáticas y la ubicación geográfica. También, se observó que mediante temperatura controlada la reducción del consumo de

energía resultó del 49% debido al uso de *PCM*. Además, de todas las ciudades evaluadas, México cuenta con los mayores ahorros de energía de hasta 150 *kWh* de reducción por año, logrados debido al uso de *PCM* durante periodos de calentamiento y enfriamiento.

Ávila *et al.* (2020) estudiaron el comportamiento térmico, ambiental y económico del uso de techos verdes (*GR*) con respecto a techos tradicionales (*TR*) en viviendas de interés social en México. El estudio se realizó para ocho ciudades que incluyen diferentes condiciones climáticas en todo el país, utilizando simulaciones en EnergyPlus. El edificio de referencia es una construcción con características físicas y materiales de construcción de un edificio típico en México basado en la NOM-020-ENER-2011. En los resultados los autores mencionan que en lugares con clima cálido el *GR* redujo la temperatura interior de la casa hasta en 4.7°C. El *GR* redujo en 45%, 31% y 42% la demanda de energía de enfriamiento para Chetumal, La Paz y Colima, respectivamente. El *GR* en Pachuca disminuyó el mayor porcentaje con 99% en la demanda de energía de enfriamiento, mientras que para Monterrey la demanda de calefacción incrementó en un 25%. En el estudio ambiental, con el uso de *GR* la mayor y menor reducción en el CO_2 fue de 45.7 y 7.3% para Chetumal y Monterrey, respectivamente. En la parte económica el mayor y menor periodo de recuperación es de 8.8 y 121.7 años para la ciudad de Hermosillo y Monterrey. Es de observarse, que, para climas extremos como Monterrey, el uso de *GR* no presenta grandes ahorros tanto térmicos como económicos, mientras que para otros tipos de climas como para la ciudad de Pachuca el periodo de recuperación es de 8.8 años lo que hace viable el uso de *GR*.

El ahorro en la carga térmica de enfriamiento se logra en función de la selección óptima de las estrategias de mitigación. Los ahorros de energía de enfriamiento aumentando la reflectancia, fueron mayores en climas cálidos y secos, mientras que, los climas templados no muestran ahorros significativos (Álvarez *et al.*, 2014; Synnefa *et al.*, 2007). Además, este tipo de estrategia contribuye a la reducción de las cargas de enfriamiento en los edificios con aire acondicionado y al mejoramiento de las condiciones de confort térmico en interiores, logrando ahorros energéticos que varían entre 10-27% (Synnefa *et al.*, 2007). El uso de techos verdes ayuda a disminuir la demanda de refrigeración en cierto tipo de clima (semi áridos) en el caso de Pachuca hasta en un 99%, mientras que para climas extremos como Monterrey la demanda de calefacción puede incrementar hasta en un 25% (Ávila *et al.*, 2020).

En el caso del uso de sombreado por efecto de los árboles, los ahorros en las cargas térmicas anuales llegan a ser de hasta el 76.6% (Chagolla *et al.*, 2012). También, utilizar mejoras en la resistencia térmica, en los acristalamientos y techos puede generar ahorros en la carga de enfriamiento de 33.3 y 8.3 *kWh*, respectivamente (Wang *et al.*, 2009). La proporción ventana-pared (*WWR*) puede generar reducciones en la demanda anual de refrigeración de hasta el 16% utilizando *WWR* del 30% (Tzempelikos y Athienitis, 2007). Es de observarse, que el uso de este tipo de alternativas ayuda a disminuir la demanda anual de energía en porcentajes considerables, es por lo que el diseño se debe considerar durante la etapa inicial ya que las decisiones tienen un impacto importante en el rendimiento energético durante la vida útil del edificio.

1.2.3 Parámetros de confort térmico utilizando el enfoque adaptativo

Tuan *et al.* (2012) presentaron una descripción del estudio de confort adaptativo para el sudeste asiático. Los autores generaron un modelo de confort adaptativo aplicable a edificios ventilados, bajo condiciones de calor y humedad. Para analizar los datos registrados de las encuestas de campo utilizaron métodos estadísticos, dado que los errores pueden surgir de muchas fuentes, como son, errores de medición, error de registro de datos o error de cálculo, es por ello que utilizaron una muestra grande para obtener estadísticas confiables. La ecuación de modelo adaptativo es similar con la de otros estándares, como el de la ASHRAE 55-2004 y la EN 15251. El estudio también encontró que, a temperaturas y humedades bastante altas, las acciones adaptativas no son muy efectivas y el rango de comodidad es, en consecuencia, menor que el de condiciones más favorables.

Wang-Fujen *et al.* (2012) evaluaron el confort térmico y la calidad del ambiente interior de un hospital en un clima cálido y húmedo. El estudio se realizó para hospitales públicos. Los autores realizaron encuestas y mediciones de campo, las encuestas se realizaron para el personal de hospital, incluyendo médicos, enfermeras, administrativos y pacientes en espera de salida, los datos recolectados fueron un total de 403 ocupantes. Las evaluaciones de campo se realizaron durante la temporada de verano (de julio a agosto), con temperaturas medias mensuales de 34°C, con una humedad relativa del 80%. La temperatura operativa modificada fue de 22.9 a 26.3°C. Los autores mencionan, que, proporcionar confort térmico en un

hospital es un problema complicado debido a las diversas condiciones físicas, requisitos y diferentes tipos de demandas.

Azizpour *et al.* (2013) realizaron un estudio de campo del confort térmico, en el hospital Centro Médico Kebangsaan de la Universidad de Malasia. El estudio se realizó para un clima cálido-húmedo con altas temperaturas y humedad relativa constante casi todo el año. Para esto, los autores tomaron diez diversas zonas térmicas de las cuales comprenden tres oficinas, farmacia, radiología, sala de oración, cocina, guardería, vestíbulo y corredor. Encuestaron a un conjunto de 188 ocupantes evitando pacientes. Las dos preguntas principales de la encuesta se basaban en comprender si el ocupante se encontraba en un ambiente térmico agradable o si le gustaría cambiar algo de ese ambiente. Teniendo los datos de la encuesta calcularon el porcentaje de personas insatisfechas (*PPD*) y el voto medio predicho (*PMV*), el cual lo calcularon con la teoría de Fanger. Los datos obtenidos se analizaron de forma subjetiva y objetiva. La temperatura efectiva neutra de acuerdo con las mediciones subjetivas y objetivas fueron 23.4°C y 21.3°C , respectivamente. Los resultados mostraron que existe una fuerte relación entre el *PPD* y el *PMV*, con una $R^2=0.88$. Las temperaturas operativas y preferidas resultaron de 23.6°C y 20.3°C , respectivamente.

Sánchez *et al.* (2015) estudiaron los límites de confort adaptativo en una vivienda de Sevilla España, con el fin de regular el uso de aire acondicionado y calefacción, para reducir el exceso de consumo de energía. Los métodos que se aplicaron a la investigación son ASHRAE Standard 55-2013 y UNE EN 15251:2008 se aplicaron a localidades situadas en climas mediterráneos semi-continentales. Los autores también realizaron encuestas a los ocupantes en el cual se incluían cuestiones sobre la sensación térmica, planta, orientación y ubicación en el edificio, prendas de ropa y nivel de actividad. La media de la temperatura del límite inferior es 19.75°C en UNE EN 15251, dicho límite inferior es en el modelo ASHRAE 55 2013 es 17.85°C .

Oropeza *et al.* (2017) propusieron modelos de confort térmico adaptativo para las cuatro principales regiones climáticas de México las cuales son (árido, trópico seco, templado y trópico húmedo), para edificios con ventilación natural y aire acondicionado. Los factores humanos (fisiológicos y psicológicos), como el sexo, la edad y la percepción psicológica, se evaluaron mediante encuestas y pruebas experimentales cara a cara y los factores físicos

como la temperatura interior, la temperatura media de radiación y la humedad relativa se midieron con su correspondiente indicador. Los factores del confort térmico se tomaron en cuenta considerando una tasa metabólica de 1.0-1.5 *met* y un factor de ropa de 0.5-1.5 *clo*, la velocidad del viento de 0.6 *m/s*, mientras que para la temperatura interior y la humedad relativa se consideran variables en función de las condiciones climáticas de cada encuesta. Los autores mencionan que las personas son capaces de soportar temperaturas superiores a 30°C en condiciones cálidas y calurosas, lo que indica beneficios térmicos y económicos.

Sattayakorn *et al.* (2017) evaluaron el confort térmico de ocupantes en edificios de hospitales. El estudio se determinó para pacientes, visitantes y para el personal, el estudio para pacientes se realizó de manera separada para comprender los requisitos específicos. Los datos fueron recolectados de julio a noviembre del 2015 y de marzo a mayo de 2016. El estudio se realizó para un total de 928 ocupantes, con un total de 451 pacientes, 331 visitantes y 146 personal médico. Los pacientes y visitantes fueron considerados como usuarios temporales con más de dos horas de tiempo promedio de espera y el tiempo máximo de permanencia se consideró de 15 y 9.5 horas para pacientes y visitantes, respectivamente. El tiempo medio de trabajo para el personal fue de 10.5 horas por día. El 65% de los pacientes y visitantes eran mujeres y el resto hombres. La media de edad de los pacientes y visitantes fue de 47 y 45 años, respectivamente, mientras que para el personal médico fue alrededor de 31 años. La norma ASHRAE 55 la utilizaron para comparar parámetros objetivos, además, se utilizaron mediciones subjetivas de la comodidad real. El rango de temperatura aceptable para pacientes, visitantes y personal médico es de 21.8 a 27.9, 22.0 a 27.1, y 24.1 a 25.6°C, respectivamente. Los autores mencionan que, los pacientes en climas tropicales prefieren temperaturas más cálidas que otros ocupantes.

López *et al.* (2017) propusieron un modelo de confort térmico adaptativo para edificios educativos, ventilados con sistema de aire acondicionado (AC) y ventilación natural (VN), para un clima tropical tipo *Aw* correspondiente a la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Los autores construyeron el modelo de confort adaptativo, correlacionando la temperatura operativa de confort interior con la temperatura exterior, para el estudio consideraron una muestra poblacional de 496 encuestados. Los encuestados fueron 70.6% hombres y 29.3% mujeres, el intervalo de edad fue de 18-68 años, el peso promedio de los encuestados fue de 70.6 *kg*.

El conjunto de ropa mayormente utilizado fue de “pantalones con camisa manga corta” que representa el 72.6%, seguido de “pantalones con camisa manga larga” representando el 15.2%, este tipo de ropa corresponde a la utilizada comúnmente en la ciudad durante la primavera. La actividad mayormente realizada en el edificio fue “sentando, escribiendo en la computadora” esto corresponde a las actividades de un edificio educativo. Para edificios con VN, la zona extensa de confort es de 24.1-29.7°C con un intervalo de 5.6°C, mientras que la reducida es de 25.5 a 28.4°C con un intervalo de 2.9. Por su parte, en edificios con AC la zona extensa de confort es de 20.7-28.3°C con un intervalo de 7.6°C, mientras que la reducida es de 22.2-26.2°C con un intervalo de 4.0°C. En condiciones de VN, los encuestados sintieron confort a temperaturas más elevadas, 2.8°C más que las personas en edificios con AC. Es de observarse que, los mecanismos de climatización activos influyen en las expectativas de confort de los ocupantes.

López *et al.* (2019) propusieron un modelo de confort térmico adaptativo para edificios educativos, para un clima tropical tipo Aw, considerando edificios climatizados con ventilación natural (VN) y aire acondicionado (AC). El estudio consideró un conjunto de 496 datos, recopilados de edificios educativos de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. El cuestionario se dividió en cuatro grupos: datos generales, información de la edificación, información del encuestado y percepción del ambiente térmico del encuestado. El modelo de confort adaptativo se construyó correlacionando la temperatura operativa de confort interior con la temperatura exterior, con base al estándar EN 15251. El modo AC, el 48.1% de los ocupantes encuestados sintió comodidad, el 44.0% sintió frío y el 7.9% sintió calor. En modo VN, el 59.7% sintió comodidad, el 11.0% sintió frío y el 29.3% sintió calor. En modo AC, las preferencias neutrales de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, fueron de 24.7 ± 1.6°C, 52.1% ± 5.2% y 0.14 ± 0.05 m/s, respectivamente; en el modo VN fueron 26.9 ± 1.3°C, 54.4% ± 5.6% y 0.13 ± 0.04 m/s. Los autores encontraron que pueden alcanzar una T_{comf} de 27.4 ± 1.9°C con una velocidad del aire de 0.17 ± 0.06 m/s para el suministro de AC. Además, para edificios ventilados naturalmente la T_{comf} puede elevarse hasta 29.3 ± 2.6°C con una velocidad del aire de 0.14 ± 0.03 m/s. Es de observarse, que, los ocupantes de edificaciones ubicados en climas tropicales prefieren temperaturas más elevadas que en otras regiones climáticas, y esto implica que se puede tener un grado de satisfacción térmica aceptable con menor capacidad de enfriamiento.

Khalid *et al.* (2019) evaluaron las condiciones térmicas existentes y las preferencias de confort térmico en tres hospitales de Malasia, en modo AC, para habitaciones de pacientes. Las encuestas de campo se realizaron en hospitales privados, en la ciudad de Kula Lumpur la cual es una región ecuatorial. El estudio se basó en 389 muestras recopiladas de 305 pacientes y 84 visitantes, en un periodo de 29 días, de enero a marzo. La sensación térmica tanto para pacientes como visitantes, con la temperatura de inicio fue “ligeramente fría”, mientras que con el modelo de confort térmico la sensación térmica para pacientes y visitantes fue de “neutro” y “fresco”, respectivamente. Los autores observaron que las condiciones de salud de los pacientes tienen efectos significativos en su temperatura. Por otra parte, las temperaturas medias de confort se estimaron en 25.3°C para los pacientes y 25.5°C para los visitantes. Las temperaturas de confort son 1.8 y 2.3°C más altas que la media superior para pacientes y visitantes, respectivamente. Es de observarse que los ajustes en la temperatura, mediante modelos de confort térmico, puede beneficiar la comodidad de los ocupantes y el ahorro energético en habitaciones de hospitales.

Las personas son capaces de soportar temperaturas superiores a 30°C en condiciones cálidas, mientras que para el clima árido las personas son capaces de soportar temperaturas mayores a 35°C conservando el confort térmico en regiones climáticas de México (Oropeza *et al.*, 2017). En edificios educativos, en climas cálidos subhúmedos, las personas pueden estar en confort a temperaturas de $27.4 \pm 1.9^{\circ}\text{C}$ (López *et al.*, 2019). Mientras que, en climas cálidos para edificios hospitalarios los trabajadores pueden estar en confort a una temperatura de 23.3 - 26.5°C (Yau y Chew, 2013), además, la temperatura operativa en habitaciones de hospitales, se pueden elevar hasta 2°C , sin comprometer la comodidad de los pacientes y generando ahorros energéticos para la habitación (Khalid *et al.*, 2019). El rango de temperatura aceptable para pacientes es de 21.8 a 27.9 en climas tropicales, además, en ese tipo de clima prefieren temperaturas más cálidas que otros ocupantes. (Sattayakorn *et al.*, 2017). Es de observarse que los ajustes en la temperatura, mediante modelos de confort térmico, puede beneficiar la comodidad de los ocupantes y el ahorro energético en habitaciones de hospitales. Además, las temperaturas más elevadas son una manera eficiente de ahorro de energía para las edificaciones sin comprometer la comodidad del ocupante. También, se observó que los ocupantes en modo mixto son más adaptables que los de aire acondicionado y menos que los de ventilación natural.

1.2.4 Optimización energética en edificaciones considerando el enfoque adaptativo

Godoy (2012) analizó modelos de confort térmico de estándares internacionales y cuantificó el ahorro energético, comparándolos con modelos que aplican en la normatividad española. La ciudad de estudio fue Madrid con un clima continental mediterráneo. Los edificios estudiados fueron una vivienda unifamiliar y una oficina estándar, para ventilación natural y aire acondicionado, respectivamente. La época de estudio comprende de mayo a septiembre, con simulación en DesignBuilder. Los seis factores que comprenden el confort térmico se utilizaron para la obtención de los límites de confort térmico, utilizando valores de diferentes normas. Los autores presentan que el modelo de la EN 15251 presenta un 93% de horas de confort en la vivienda, mientras que el modelo ISO 7730 presenta un 57% en las horas de confort. El porcentaje de ahorro energético para el edificio de oficina alcanzó un 50% de un estándar respecto a otro. Es de observarse que la utilización de diferentes estándares de confort varía una con la otra, por lo cual es importante tomar en cuenta el estándar que se utilizara para la edificación de estudio.

Griego *et al.* (2015) realizaron un estudio para evaluar combinaciones de medidas de eficiencia energética y confort térmico en edificios residenciales en Salamanca, Guanajuato. En el estudio se consideran edificios residenciales existentes y uno de nueva construcción. El confort térmico se evalúa utilizando el modelo de confort de Fanger para estimar el voto medio predicho (*PMV*) para cada hora del año. Los estudios relacionan las mejoras del confort térmico con el ahorro energético y económico. Los autores concluyen que, para lograr un mayor confort térmico y lograr un ahorro anual de energía de hasta el 52% se debe poner un mayor énfasis en la implementación de los niveles de aislamiento térmico de techos y paredes.

Attia y Carlucci. (2015) evaluaron el impacto de diferentes modelos de confort térmico en edificios residenciales de energía neta cero, en un clima cálido. Los modelos de confort térmico utilizados son; la aplicación del modelo de Fanger, el modelo de Givoni, el modelo de ASHRAE 55, y el modelo de la EN 15251, utilizando simulación en EnergyPlus. El ahorro de energía utilizando un modelo de confort adaptativo se estimó en un 10-18% de la carga total de refrigeración. Además, el estudio muestra que el porcentaje de diferencia de consumo

de energía que cumple los criterios de confort según ISO 7730 en comparación con EN 15251, ASHRAE 55 o el modelo de Givoni varió hasta 16.0, 21.0 y 24.7%, respectivamente. Es de observarse que la selección de un modelo de confort térmico para establecer condiciones de confort térmico en interiores tiene un impacto importante en el consumo de energía de los edificios en climas cálidos.

Manu *et al.* (2016) realizaron un estudio para determinar un modelo de confort térmico adaptativo para la India en edificios con ventilación natural, modo mixto y aire acondicionado. El estudio lo realizaron mediante encuestas instantáneas de confort térmico en edificios de oficina, en las ciudades más representativas de la India, con un total de 6630 datos registrados. La temperatura neutra aceptable con ventilación natural varía de 19.6 a 28.5°C para temperaturas exteriores promedio de 22.0°C. En edificios de modo mixto la temperatura neutra varía de 21.5 a 28.7°C para temperaturas exteriores promedio de 26.0°C. También, los resultados del modelo indican que la temperatura exterior tiene muy poco efecto sobre el confort térmico en edificios con aire acondicionado. Los autores mencionan que a partir de los modelos adaptativos se logran ahorros energéticos de 10-50%. También, los resultados muestran que las personas en edificios de oficina con VN, son más adaptables que lo que sugieren los modelos de estándares internacionales como son la EN y ASHRAE.

Gallego (2017) evaluó la reducción económica que conlleva el uso del modelo de confort térmico adaptativo. El modelo se obtuvo a partir de monitorización y encuestas aplicadas a los usuarios de las viviendas sociales en Concepción Chile, frente a los establecidos en las normas 15251:2007 y ASHRAE 55:2013. El autor determinó una muestra representativa de las viviendas para el estudio, analizó las encuestas aplicadas a 135 personas y el cálculo de las temperaturas de confort de los usuarios e hizo el comparativo con los modelos de confort adaptativo de las normas EN 15251:2007, ASHRAE 55:2013 y CAS. Los autores concluyen que existió una reducción en los costos de ejecución en mejoramientos de la envolvente térmica para alcanzar un tiempo de confort en oscilación libre similar al obtenido a partir de la aplicación del modelo de la norma EN 15251:2007 y de ASHRAE 55:2013. Sin embargo, en la hipótesis se conjeturó una reducción alrededor del 20%, dicha reducción adquirió un valor del 28.84%.

El ahorro de energía utilizando un modelo de confort adaptativo se ha reportado en el intervalo de 10-50%, en términos de las cargas anuales de energía (Gallego, 2017; López, 2019; Attia y Carlucci, 2015; Godoy, 2012). Es de observarse, que, la selección de un modelo de confort térmico para establecer condiciones de confort térmico en interiores tiene un impacto importante en el consumo de energía de los edificios en climas cálidos.

1.2.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica

El diseño de una habitación climatizada con mínimo consumo de energía convencional para un clima cálido, está en función de la estrategia de mitigación energética adecuada (Bhamare *et al.*, 2019). Por otra parte, para llegar a la factibilidad de diseñar una habitación climatizada con bajo o nulo consumo de energía convencional, es importante considerar estrategias de mitigación energética como; la orientación óptima del edificio, el nivel de aislamiento térmico, acristalamiento, la masa térmica, ventilación nocturna, techo verde y aislamiento de paredes, entre otros, ya que permiten disminuir hasta un 42% la carga energética del edificio (Eshraghi *et al.*, 2014; Perlova *et al.*, 2015; Ran y Tang 2018; Oropeza *et al.*, 2019 y Hsieh *et al.*, 2018). Por otra parte, la temperatura operativa en habitaciones de hospitales, se puede elevar hasta 2°C, sin comprometer la comodidad de los pacientes y generando ahorros energéticos para la habitación (Khalid *et al.*, 2019). Es de observarse que los ajustes en la temperatura, mediante modelos de confort térmico, puede beneficiar la comodidad de los ocupantes y el ahorro energético en habitaciones de tipo hospital. El ahorro de energía utilizando un modelo de confort adaptativo se ha reportado en el intervalo de 10-50%, en términos de las cargas anuales de energía (Gallego, 2017; López, 2019; Attia y Carlucci, 2015; Godoy, 2012). La selección de un modelo de confort térmico adaptativo para establecer condiciones de confort térmico en interiores tiene un impacto importante en el consumo energético en climas cálidos (Godoy, 2012; Attia y Carlucci, 2015). Es de observarse, que, en la literatura no se encontró un estudio del uso de estrategias de mitigación en conjunto con el enfoque adaptativo para una habitación tipo hospital.

1.3 Objetivos y alcances

Los objetivos y alcances del trabajo de tesis se plantean con base a la revisión bibliográfica.

1.3.1 Objetivo general

Estudiar la factibilidad del diseño de una habitación climatizada hacia cero energías convencionales en un clima cálido, considerando el enfoque adaptativo, en términos de la carga térmica de enfriamiento anual y los costos asociados.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer una habitación de estudio, de tipo hospital.
- Evaluar la carga térmica de enfriamiento anual de la habitación considerando estrategias de mitigación y el enfoque adaptativo.
- Proponer modificaciones a la habitación climatizada, buscando la factibilidad de cero energías convencionales.
- Realizar un comparativo térmico y económico de la habitación con y sin consideraciones de enfoque adaptativo y estrategias de mitigación energética.

1.3.3 Alcances

- Diseñar una habitación climatizada con estrategias de mitigación energética en dos ciudades cálidas, representativas de la República Mexicana, implementando modelos de confort térmico basados en el enfoque adaptativo.
- Evaluar las cargas térmicas de enfriamiento anuales de una habitación tipo hospital, utilizando el software de simulación TRNSYS.

1.4 Estructura de Tesis

El estudio se presenta en cinco capítulos, en el **Capítulo 1** se presenta la motivación, la revisión bibliográfica, los objetivos y los alcances de la tesis. En el **Capítulo 2** se muestran los fundamentos teóricos, las estrategias de mitigación de consumo energético, el caso de estudio, así como también la metodología de las estrategias de optimización. En el **Capítulo 3** se presentan los modelos térmicos de las estrategias de optimización energética y la construcción de la plataforma de simulación. En el **Capítulo 4** se muestran los resultados del desempeño térmico de las estrategias de mitigación energéticas y la factibilidad de climatizar con cero energías convencionales. Por último, en el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones del trabajo y las recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos, los modelos térmicos de estrategias de mitigación de consumo energético, el caso de estudio y la metodología de las estrategias de optimización.

2.1 Fundamentos teóricos

En este apartado se presentan los fundamentos teóricos que describen el comportamiento térmico de las edificaciones.

2.1.1 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor a través de los cerramientos de una edificación se da por tres mecanismos de transferencia: conducción, convección y radiación.

Conducción

La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas que se da por medio de la energía cinética de las partículas, basado en el contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia y que tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo en contacto. La ecuación general que rige la transferencia de calor por conducción a través de una placa plana está dada por la **Ec. 2.1**.

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

donde Q_{cond} es el flujo de calor por conducción (W), k es la conductividad térmica del material ($W/m \cdot K$), A es el área expuesta al flujo de calor (m^2), $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura.

Convección

La transferencia de calor por convección se refiere a la transferencia de energía debido al movimiento molecular aleatorio (difusión) y a la energía que se transfiere mediante el movimiento global o macroscópico de un fluido. El movimiento de un fluido se asocia con el hecho de que grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. La transferencia de calor por convección se rige mediante la ley de enfriamiento de Newton, cuya expresión se presenta en la **Ec. 2.2**.

$$Q_{conv} = h_{conv} A (T_s - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

donde Q_{conv} es el flujo de calor por convección (W), h_{conv} es el coeficiente convectivo ($W/m^2 \cdot K$), A es el área superficial expuesta y $(T_s - T_{\infty})$ es la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

Radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere de un medio material para transmitir energía, es decir, el calor se puede transferir en el vacío. La transferencia de calor por radiación se rige por la ley de Stefan-Boltzmann, la cual se expresa por la **Ec. 2.3**.

$$Q_{rad} = \sigma \varepsilon A (T_s^4 - T_\infty^4) \tag{2.3}$$

donde σ es la constante de Stefan- Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$, ε es la emisividad, A es el área radiante y T es la temperatura de la superficie y el fluido.

2.1.2 Geometría solar

Las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación particular con relación a la tierra en cualquier momento, la radiación solar entrante y la posición del sol con respecto a ese plano se puede describir en términos de varios ángulos.

ϕ **Latitud**, es la ubicación angular al norte o al sur del Ecuador, norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$

δ **Declinación**, es la posición angular del sol al medio día, es decir, cuando el sol está al meridiano local, con respecto al Ecuador, norte positivo; $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$.

β **Inclinación**, el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal; $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, ($\beta > 90^\circ$ significa que la superficie tiene un componente orientado hacia abajo).

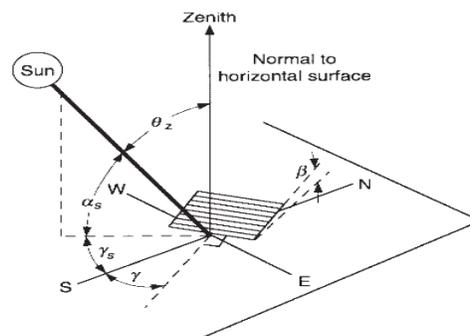


Figura 2.1 Ángulo cenital, pendiente, ángulo acimutal de superficie y ángulo acimutal solar para una superficie inclinada.
Fuente: Duffie y Beckman, (2013).

γ **Ángulo de acimut de superficie**, la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie desde el meridiano local, con cero al sur, este negativo y oeste positivo; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

θ **Ángulo de incidencia**; es el ángulo entre la radiación del haz en una superficie y la normal a esa superficie.

Los siguientes ángulos describen la posición del sol en el cielo, se muestran de manera gráfica en la **Figura 2.1**.

Θ_z **Ángulo cenital**; el ángulo entre la vertical y la línea al sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación sobre una superficie horizontal.

α_s **Ángulo de altitud solar**; el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, es decir, el complemento del ángulo cenital.

γ_s **Ángulo acimutal solar**; el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación del haz en el plano horizontal. Los desplazamientos al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos.

La declinación se puede calcular con la ecuación aproximada de Cooper (1969) se expresa con la **Ec. 2.4**.

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2.4)$$

2.1.3 Plataforma de simulación

TRNSYS es un simulador de sistemas en estado transitorio, la gran mayoría de simulaciones se centran en evaluar el rendimiento de los sistemas de energía térmica y eléctrica. TRNSYS se integra de dos componentes, el primero se encarga de leer y procesar los archivos de entrada, resuelve iterativamente el sistema, determina la convergencia y traza las variables del sistema; la segunda parte es una extensa biblioteca de componentes, cada uno de los cuales, modela el rendimiento de una parte del sistema. La forma de trabajar en TRNSYS es conectando gráficamente las subrutinas del sistema (Types) por medio de la interfaz visual Simulation Studio, cada uno de los Types se describen con un modelo matemático mediante lenguaje de programación Fortran. Los componentes se describen como una caja negra por

medio de entradas y salidas, esencialmente TRNSYS es un solucionador de ecuaciones algebraicas y diferenciales capaz de leer y procesar un archivo de datos de entrada de texto para posteriormente resolver el sistema iterativamente, determinando la convergencia. TRNSYS trabaja mediante modelos basados en balances de energía, el manual (Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild) proporciona una referencia completa sobre los balances que se generan en cada elemento.

El componente (Type56) modela el comportamiento térmico de un edificio dividido en diferentes zonas térmicas, para utilizar este componente, primero se debe ejecutar un programa de preprocesamiento independiente. El programa TRNBuild lee y procesa un archivo que contiene la descripción del edificio y genera dos archivos que utiliza el Type56 durante la simulación.

En la **Tabla 2.1** se presenta la descripción de las subrutinas que conforman el programa de simulación para este estudio.

Tabla 2.1 Descripción de las subrutinas utilizadas en el programa de simulación.

Subrutina	Descripción
Type 109-TMY2	Lector de datos meteorológicos
Type33	Cálculo de la temperatura del bulbo seco y humedad relativa
Type69b	Cálculo de la temperatura efectiva del cielo
Type56a	Modela el comportamiento térmico del edificio
Type25a	Genera un archivo de salida en formato Excel
Type24	Integra datos durante un periodo de tiempo
Type65a	Muestra de manera gráfica los resultados

2.2 Confort térmico

En la **Figura 2.2** se presentan las teorías del confort térmico y los estímulos físicos con los que interactúa. El concepto de confort térmico se define como “*estado mental, que expresa satisfacción con el ambiente térmico*” (ASHRAE 55, 2013).

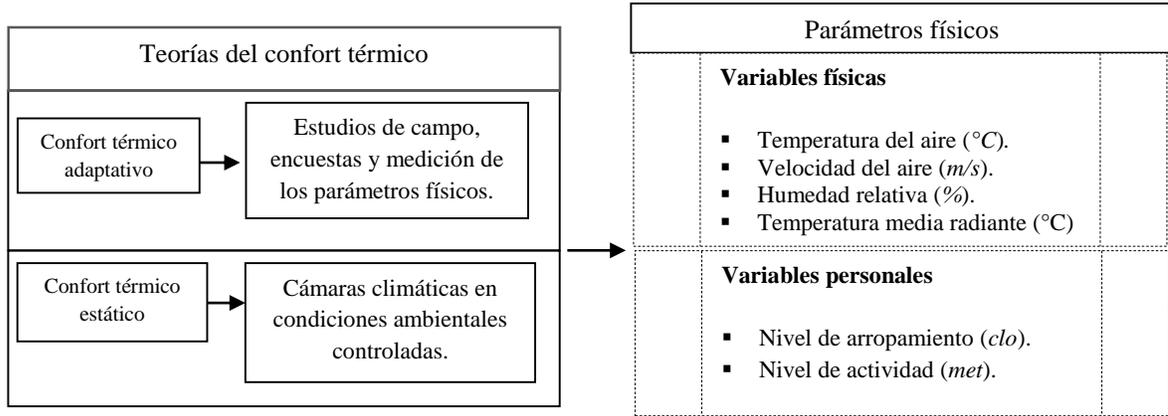


Figura 2.2 Teorías del confort térmico y parámetros físicos.

2.2.1 Parámetros que afectan el confort térmico

En esta sección se presentan los seis factores que afectan la sensación térmica, Macphersonen 1962 definió los siguientes: temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa, temperatura radiante media, nivel de arropamiento y nivel de activada (Lin y Deng, 2008).

Temperatura del aire

La temperatura del aire es uno de los parámetros principales para determinar el confort térmico de un espacio, se expresa generalmente en °C. El organismo de una persona no detecta la temperatura del aire, si no las pérdidas o ganancias de calor. En el caso de que la temperatura del aire esté por debajo de la temperatura de la piel, la velocidad de este provocará una pérdida de calor que generará una sensación de frescura, pero, si es al revés, el cuerpo tomará calor del aire (Pérez, 2014).

Velocidad del aire

El caudal de aire es el valor de un movimiento de aire en una determinada dirección, se expresa en unidades de m/s (Özdamar y Umaroğullari, 2018). La velocidad del aire ambiente afecta el confort térmico de los usuarios. El cuerpo humano comienza a evaporarse y

presentar pérdidas de calor, a medida que aumenta la velocidad del aire. Según ASHRAE, para que un ambiente obtenga condiciones de confort, la velocidad del aire debe ser de 0.15 m/s, este valor cambia según las estaciones de verano o invierno.

Humedad relativa

La humedad relativa se denomina como la cantidad de agua suspendida en el aire se expresa en porcentaje %. El porcentaje de humedad relativa (*HR*) influye en la sensación térmica, en un ambiente caluroso, si los valores son altos, impiden que el cuerpo humano pierda calor por evaporación, es decir, por el sudor, pero si son muy bajos el organismo se puede deshidratar (Cortés, 2015).

La norma ISO 7730 recomienda un rango de humedad relativa del 30-70%. El Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) aconseja por razones sanitarias mantener la humedad relativa dentro del campo del 40 al 60% en su conjunto, donde el crecimiento de microorganismos es mínimo. En la **Figura 2.3** se presentan los rangos aceptables de la humedad relativa.

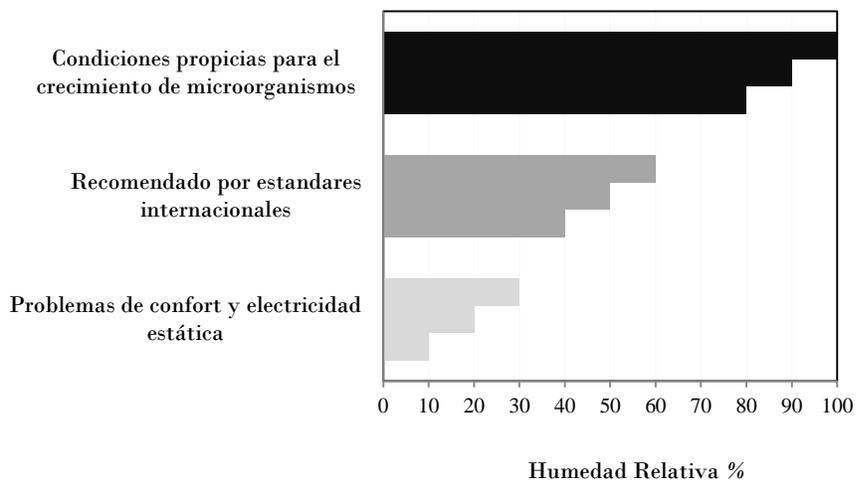


Figura 2.3 Rangos aceptables de la humedad relativa para el confort térmico.

Temperatura media radiante

La temperatura media radiante es la temperatura uniforme de un cuerpo negro con la que un individuo intercambia la misma cantidad de calor que con su entorno actual. Su valor se

obtiene en función de la temperatura del aire, la temperatura seca del aire y la velocidad del aire (Godoy, 2012). El cálculo de la temperatura media radiante se expresa con la **Ec. 2.5**.

$$T_{rm} = T_{globo} + 1.9 (T_{globo} - T_{sa}) \sqrt{v_{ar}} \quad (2.5)$$

donde T_{globo} es la temperatura del globo, V_{ar} es la velocidad del aire y T_{sa} es la temperatura seca del aire.

Nivel de arropamiento

El arropamiento es un factor que determina la sensación térmica, se mide con coeficientes de transmisión térmica y la unidad es el *clo* (clothing), esta unidad equivale a una resistencia térmica de $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$. La vestimenta, ayuda a disminuir o aumentar los efectos de los parámetros climáticos, ya que esta repercute en el intercambio de calor por convección, conducción, evaporación y radiación del individuo y el exterior (Cortés, 2015). La ropa ofrece una eficaz protección frente a la radiación solar, si es oscura, absorbe la radiación de onda más corta, si la ropa es blanca, son reflejadas. En la **Tabla 2.2** se presenta el factor de ropa (*clo*) para distintos tipos de vestimentas, de acuerdo con la norma ISO 7730.

Tabla 2.2 Factor de ropa para distintas vestimentas.

Fuente: ISO 7730

Vestimenta	Factor de ropa (<i>clo</i>)
Desnudo	0
Pantalones cortos	0.1
Ropa de verano ligera (pantalón largo y ligero, camisa de cuello abierto y manga corta)	0.5
Conjunto de trabajo ligero (Shorts deportivos, calcetines de lana, camisa de trabajo de algodón, pantalones de trabajo)	0.6
Traje típico de negocios	1
Traje típico de negocios más abrigo de algodón	1.5
Ropa deportiva ligera al aire libre (Camisa de algodón, pantalones, camiseta, pantalones cortos, calcetines, zapatos, chaqueta de popelina de una sola capa)	0.9
Traje de negocios tradicional europeo pesado	1.5

Nivel de actividad

La unidad de medida del calor metabólico es el *met* (metabolic energy termal) que equivale a 50 kcal/hm^2 que corresponde a una persona inactiva. En la **Tabla 2.3** se presenta la tasa metabólica de distintas actividades, según la norma ISO 7730.

Tabla 2.3 Tasa metabólica a diferentes actividades.

Fuente: ISO 7730

Nivel de actividad	Tasa metabólica (<i>met</i>)
Sentado, relajado	1.0
Sentado, trabajo ligero (oficina, hogar, escuela, laboratorio)	1.2
De pie, trabajo ligero (Compras, laboratorio, trabajo ligero de fábrica)	1.6
De pie, trabajo moderado (venta, tareas domésticas, operador de máquina)	2.0
Caminata 2 <i>km/h</i>	1.9
Caminata 3 <i>km/h</i>	2.4
Caminata 4 <i>km/h</i>	2.8
Caminata 5 <i>km/h</i>	3.4

Los mecanismos fundamentales de intercambio de calor entre el hombre y su entorno son la radiación, la convección y la evapotranspiración (Cortés, 2015). En la **Figura 2.4** se presenta el balance térmico en el cuerpo humano con su entorno.

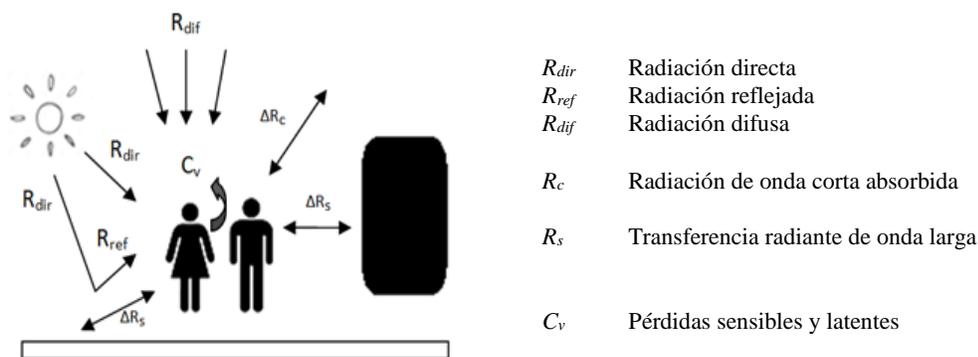


Figura 2.4 Balance térmico en el cuerpo humano.

Fuente: Cortés, 2015.

La carga térmica se define como la cantidad de calor que debe ser retirada del sitio por refrigeración para mantener una temperatura deseada. En un área por acondicionar, la carga térmica se debe eliminar mediante enfriamiento, el cual resulta de la suma de las cargas térmicas en las que están involucradas diversas variables. Las ganancias térmicas son producidas por la emisión de calor de los ocupantes, los aparatos electrónicos y la iluminación. El balance o equilibrio térmico puede expresarse con la **Ec. 2.6**.

$$Q_{sol} + Q_{int} + Q_{cond} + Q_m - Q_e = 0 \tag{2.6}$$

donde Q_{sol} son las ganancias solares, Q_{int} son las ganancias internas, Q_{cond} son las ganancias y pérdidas por conducción, Q_m las ganancias y pérdidas mecánicas y Q_e las pérdidas evaporativas.

2.2.2 Modelos de confort estático/adaptativo

La definición de confort térmico se divide en dos teorías diferentes, cada una con su potencial y sus limitantes. La teoría estática y la teoría adaptativa son las teorías existentes en la actualidad para la evaluación del confort térmico. La teoría estática o del balance térmico se basa en estudios con cámaras climáticas, mientras que la teoría adaptativa es por medio de estudios de campo (Godoy, 2012).

Modelos estáticos

El modelo estándar o estático fue de los primeros estudios desarrollados con base al confort térmico. Fanger realizó estudios en cámaras térmicas en condiciones ambientales controladas a un grupo de 1300 universitarios, prediciendo la sensación térmica y su respectivo porcentaje de insatisfacción con el ambiente térmico, mediante el *PMV* “Predicted Mean Vote” (voto medio predicho) y el *PPD*, “Predicted Percentage of Dissatisfied” (porcentaje de personas insatisfechas) por sus siglas en inglés, (Arballo *et al.*, 2016). Los estudios se aplicaron en edificios climatizados y controlados mecánicamente, hoy en día se aplican para todo tipo de edificios y todo tipo de clima (Godoy, 2012). El *PMV* expresa el valor medio de la sensación subjetiva de confort de un grupo de personas en un ambiente determinado. En la **Figura 2.5** se observa las seis variables para el cálculo del *PMV*.

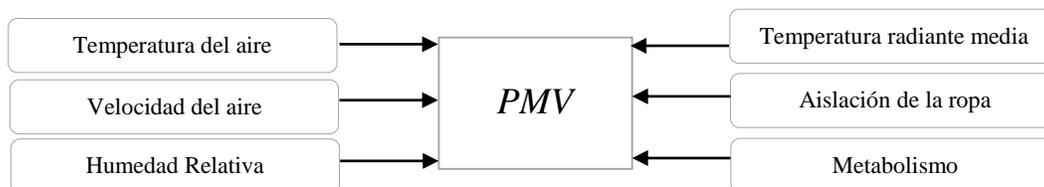


Figura 2.5 Parámetros de entrada del *PMV*.

El estándar ASHRAE 55 define una escala subjetiva (voto de sensación térmica) de siete puntos, basada en el balance de calor del cuerpo humano, a partir de la cual se puede cuantificar el *PMV*. El equilibrio térmico es obtenido cuando la producción de calor interno en el cuerpo es igual a la pérdida de calor al ambiente. En un ambiente moderado, el sistema

termorregulador humano intentará modificar automáticamente la temperatura de la piel y la secreción de sudor para mantener el equilibrio térmico. En la **Tabla 2.4** se muestra la escala de sensación térmica de siete puntos.

Tabla 2.4 Sensación térmica en función del PMV.

Puntuación	Sensación térmica
+3	Muy caluroso
+2	Caluroso
+1	Ligeramente caluroso
0	Neutralidad térmica
-1	Fresco
-2	Frío
-3	Muy frío

Las **Ec. 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10** determinan el *PMV* de acuerdo con la norma ISO 7730

$$PMV = [0.303 \cdot \exp(0.036 \cdot M) + 0.028] \cdot \{(M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 \cdot (M - W) - Pa] - 0.42 \cdot [(M - W) - 58.15 - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - Pa) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (\overline{T_{rm}} - 273)^4] - f_{cl} \cdot h_{conv} \cdot (T_{cl} - T_a)]\} \quad (2.7)$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(T_{cl} + 273)^4 - (\overline{T_{rm}} - 273)^4] + f_{cl} \cdot h_{conv} \cdot (T_{cl} - T_a)\} \quad (2.8)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0.25} & \text{para } 2.38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{V_{ar}} \\ 12.1 \cdot \sqrt{V_{ar}} & \text{para } 2.38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{V_{ar}} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \cdot I_{cl}, & \text{si } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^2/\text{W} \\ 1.05 + 0.645 \cdot I_{cl}, & \text{si } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^2/\text{W} \end{cases} \quad (2.10)$$

donde *M* es la tasa metabólica (W/m^2), *W* es la potencia mecánica efectiva, en (W/m^2), *I_{cl}* es el aislamiento de la ropa, ($m^2 \cdot K / W$), *f_{cl}* es el factor de superficie de la ropa, *T_a* es la temperatura del aire en ($^{\circ}C$), *T_{rm}* temperatura radiante media en ($^{\circ}C$), *V_{ar}* es la velocidad del aire en (*m/s*), *P_a* es la presión parcial de vapor de agua en (*Pa*), *h_{conv}* es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en ($W/(m^2 \cdot K)$), *T_{cl}* la temperatura de la superficie de la ropa en ($^{\circ}C$). El porcentaje de personas insatisfechas (*PPD*) se determina mediante la **Ec. 2.11** de Fanger, la cual se presenta de la siguiente manera:

$$PPD = 100 - 95 \times \exp^{-(0.03353 \times PMV^4 + 0.2179 \times PMV^2)} \quad (\%) \quad (2.11)$$

En la **Figura 2.6** se muestra el modelo estándar desarrollado por Fanger el cual define un mínimo de 5% de disconformidad posible a una temperatura de neutralidad (0 en la escala de siete puntos de *PMV*).

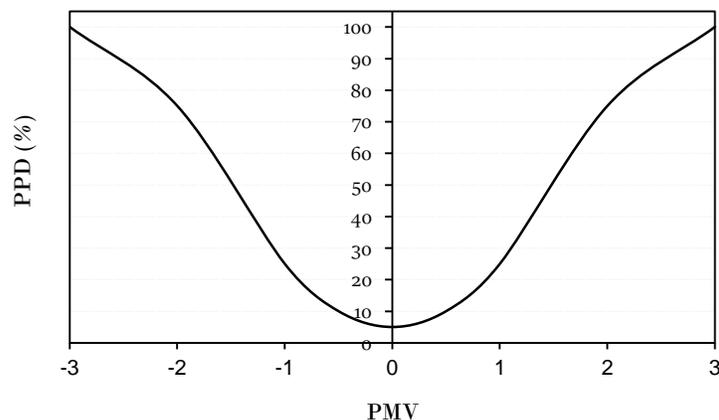


Figura 2.6 PPD en función del PMV.

El modelo estático responde a ciertas condiciones y restricciones, como: el cuerpo se encuentra en un balance de calor; la temperatura media de la piel y la tasa de sudoración, influenciando al balance de calor, están bajo ciertos límites; y la disconformidad local no existe. El término en inglés “steady-state” es el más adecuado para definir el tipo de modelo de confort térmico que se basa en estudios de cámara climática sometidos a condiciones constantes y fijas a través sistemas de climatización total (Arballo *et al.*, 2016). Las limitantes que ofrece el modelo estático mencionado por diversos autores son las condiciones controlables para la medición, lo cual no es posible en los estudios de campo o en un entorno real. Los ambientes cambiantes que viven las personas no pueden ser controlables, lo que genera un problema en cuanto a ciertas condiciones térmicas de los ocupantes (Godoy, 2012).

Modelos adaptativos

El enfoque adaptativo se basa en estudios de campo mediante métodos estadísticos, los cuales, por medio de encuestas de campo, registran información de las sensaciones y el comportamiento de ocupantes en edificios reales. Los modelos de confort térmico adaptativo se obtuvieron de la literatura, de acuerdo con los estándares internacionales y modelos lineales de distintos autores para diferentes condiciones climáticas, los cuales se describen a continuación:

Guía A de CIBSE

CIBSE es una asociación internacional de profesionales de la ingeniería encargada de desarrollar diversas guías y documentos para temas de construcción, ingeniería y sustentabilidad. La Guía A de CIBSE ofrece recomendaciones para mejorar la calidad ambiental de los espacios interiores en edificios. Los criterios se basan en el concepto del enfoque adaptativo. La Guía A emplea la **Ec. 2.12**, del proyecto europeo *Smart Controls and Thermal Comfort (SCATs)* bajo un algoritmo del enfoque adaptativo, para definir los rangos de temperatura de confort en edificios con funcionamiento en modo mecánico.

$$T_{conf} = 0.09 \cdot T_{rm} + 22.6 \quad (2.12)$$

ASHRAE 55

El modelo ASHRAE 55, es un modelo propuesto por de Dear y Brager el cual incluye una recopilación de una cantidad relativamente grande de información proveniente de cientos estudios de campo alrededor del mundo, la cual contiene más de 21,000 muestras de evaluaciones de confort tomadas de 160 edificios de oficina. Este modelo fue formulado en el marco del proyecto RP-884 de ASHRAE, el cual abordó el desarrollo de un modelo basado en el enfoque adaptativo. La **Ec. 2.13** presenta el modelo de confort planteado por de Dear y Brager, el modelo define los rangos de temperatura de confort en edificios en funcionamiento en modo pasivo.

$$T_{conf} = 0.31 \cdot T_{m,ext} + 17.8 \quad (2.13)$$

Modelos de Humphreys y Nicol

Investigadores como Humphreys y Nicol han propuesto varios modelos de confort térmico. La **Ec. 2.14** y **Ec. 15** presentan modelos de confort correspondientes a edificios pasivos y edificios con sistemas de climatización mecánicos, respectivamente.

$$T_{conf} = 0.534 \cdot T_{m,ext} + 11.9 \quad (2.14)$$

$$T_{conf} = 0.295 \cdot (T_{m,ext} - 22) \exp\left(-\left[\frac{T_{m,ext} - 22}{24\sqrt{2}}\right]^2\right) + 23.9 \quad (2.15)$$

En la **Tabla 2.5** se presentan los modelos de confort térmico adaptativo de distintos autores, con diferentes condiciones climáticas y para distintos edificios, en modo, ventilación natural, aire acondicionado y mixto. Además, se muestra el intervalo de confort térmico de cada modelo.

Tabla 2.5 Modelos de confort térmico adaptativo y parámetros de confort térmico en edificaciones.

Autor	Clima	Tipo de edificio	Condiciones	Modelo	Observaciones	
Oropeza <i>et al.</i> (2017)	Árido	Edificios residenciales	Ventilación natural	$T_{conf}=0.59 \cdot T_{rm} + 11.62$	Las ocupantes son capaces de soportar temperaturas de hasta 35°C	
			Aire acondicionado	$T_{conf}=0.59 \cdot T_{rm} + 9.60$		
	Trópico húmedo		Ventilación natural	$T_{conf}=0.47 \cdot T_{rm} + 14.07$		Las personas son capaces de soportar temperaturas superiores a 30°C en condiciones cálidas y calurosas
			Aire acondicionado	$T_{conf}=0.47 \cdot T_{rm} + 9.07$		
	Trópico seco		Ventilación natural	$T_{conf}=0.96 \cdot T_{rm} - 3.6$		
			Aire acondicionado	$T_{conf}=0.96 \cdot T_{rm} - 5.62$		
López <i>et al.</i> (2019)	cálido sub-húmedo	Edificios educativos	Ventilación natural	$T_{conf}= 0.32 \cdot T_{rm} + 18.45$	$29.3 \pm 2.6^{\circ}C$	
			Aire acondicionado	$T_{conf}=0.13 \cdot T_{rm} + 22.70$	$27.4 \pm 1.9^{\circ}C$	
Tuan <i>et al.</i> (2012)	Clima cálido	Ventilación natural	Ventilación natural	$T_{conf}=0.341 \cdot T_{rm} + 18.83$	$26- 34^{\circ}C$	
Yau y Chew (2013)	Clima cálido	Hospitales	Aire acondicionado	$T_{conf}=0.33 \cdot T_{out} + 14.85$	$23.3-26.5^{\circ}C$	
Indraganti (2010)	Clima cálido	Apartamentos	Ventilación natural	$T_{conf}=0.506 \cdot T_{out} + 11.39$	$26-32.45^{\circ}C$	
Manu <i>et al.</i> (2016)	-	Edificios de oficina	Ventilación natural	$T_{conf}=0.54 \cdot T_{rm} + 12.83$	$19.6-28.5^{\circ}C$	
			Modo mixto	$T_{conf}=0.28 \cdot T_{rm} + 17.87$	$21.5-28.7^{\circ}C$	

Selección de modelos de confort térmico adaptativo

Los modelos seleccionados para el estudio fueron; Guía A de CIBSE, el modelo de López *et al.* (2019) y por último el modelo de Yau y Chew (2013) para hospitales. Estos modelos se seleccionaron de acuerdo con la condición de funcionamiento, en este caso para AC. El modelo de la Guía A de CIBSE se seleccionó ya que es un modelo de estándar internacional y aplica para edificios en funcionamiento con AC. El modelo de López *et al.* (2019) se seleccionó por ser un modelo local, el cual se propuso para un clima cálido de México. El modelo propuesto por Yau y Chew (2013) se seleccionó por ser un modelo para edificios de hospital en funcionamiento de AC y para clima cálido.

2.3 Estrategias de mitigación de consumo energético

En esta sección se presentan las estrategias de mitigación energética. En la **Tabla 2.6** se presentan los ahorros de diferentes autores, utilizando estrategias de mitigación energética para la climatización, para ventilación natural y aire acondicionado.

Tabla 2.6 Estrategias de mitigación.

Autor	Ciudad/ clima	Estrategia pasiva	(kWh/m ²) sin estrategia	(kWh/m ²) con estrategia	T _{int} sin estrategia °C	T _{int} con estrategia °C	% Ahorro kWh	≠ de T °C
Oropeza (2019)	CDMX (BsK)	Sistema de sombreado	1350	182	-	24,86	-	
		Material de cambio de fase	1650	87	-	22,96	-	
		Refugio pasivo de enfriamiento	1640	59	-	31,61	-	
		Disipador de calor	1540	105	-	23,97	-	
		Capacidad térmica	1110	103	-	24,65	-	
		Barrera de calor radiante	360	13	-	26,31	-	
		Enfriamiento eco- evaporativo	1340	18	-	31,27	-	
		Ventilación natural	1370	65	-	24,71	-	
		AC asistido por energía solar	1410	36	-	32,44	-	
Marinet <i>et al</i> (2016)	México (BsK)	PCM	447	250	-	-	44.07	
	Calama (Bwk)		827	529	-	-	36.03	
	Chile (Csb)		718	545	-	-	24.09	
	Sudáfrica (cFb)		454	281	-	-	38.11	
Ran y Tang (2018)	Shanghái (Cfa)	Techo verde	-	-	34.4	30.00	-	4.40
		Paredes aisladas	-	-	34.4	32.10	-	2.30
		Ventilación nocturna	-	-	34.4	32.90	-	1.50
Hanan (2014)	Dubái (cálido)	Enfriamiento pasivo	-	-	45	25.00	23,60	20.00
Wang <i>et al.</i> (2009)	Reino Unido	Suelo radiante	6008.9	401.7	-	-	93.31	
Synnefaer <i>et al.</i> (2007)	Cairo	Reflectancia solar 0.65	36.6	33.3	-	-	26.00	3.30
	CDMX		36.8	34.3	-	-	-	2.50
	Miami		46.2	43	-	-	-	3.20
	LA		37.7	34.5	-	-	-	3.20
	Barcelona		47.3	44.3	-	-	-	3.00
	Athens		39.6	36.7	-	-	-	2.90
	Roma		40.1	37.1	-	-	-	3.00
	Tokio		31.2	28.4	-	-	-	2.80

Materiales altamente reflectantes

Los materiales altamente reflectantes son una técnica pasiva, que ayuda a reducir la demanda térmica de refrigeración en edificaciones y a su vez mejorar el microclima urbano al reducir la temperatura de la superficie, generando ahorros térmicos y ambientales (Santamouris *et al.*, 2011). Los cuales se caracterizan por:

Alta reflectancia solar: es una medida de la capacidad de un material de superficie para reflejar la radiación solar y designa la reflectancia total de una superficie considerando la reflectancia hemisférica de la radiación, integrada en el espectro solar, se mide en una escala del 0 al 1 o (0 a 100%).

Alta emisividad de infrarrojos (ϵ): es una medida de la capacidad de una superficie para liberar calor absorbido, se mide en una escala del 0 al 1.

En la **Figura 2.7** se presenta los principios básicos de los materiales fríos, los cuales constan de una alta reflectancia solar y alta emisividad infrarroja, permitiendo menor absorción de la radiación solar y menor liberación de calor, lo que provoca una menor temperatura de la envolvente y menor transmisión de calor hacia la edificación.

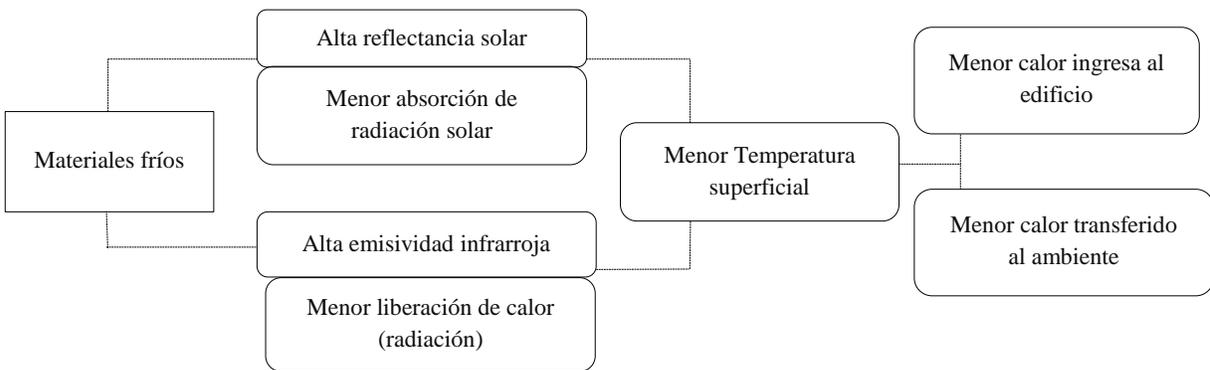


Figura 2.7 Principios básicos de los materiales fríos.
 Fuente: Santamouris, Synnefa y Karlessiet (2011)

La ecuación que describe el equilibrio térmico de una superficie horizontal bajo el sol (techo) es la siguiente **Ec. 2.16**.

$$(1-R)I = \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c (T_s - T_{air}) - k \frac{dT}{dx} \tag{2.16}$$

donde I es la insolación (W/m^2), σ la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=56.685 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$), h_{conv} es el coeficiente de convección ($W/m^2 \cdot K$), T_{sky} temperatura del cielo ($^{\circ}C$), T_{air} es la temperatura del aire ($^{\circ}C$), R es la reflectancia solar o albedo de la superficie, ξ es la emitancia de la superficie, k la conductividad térmica de la superficie ($W/m \cdot K$) y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura.

En la **Tabla 2.7** se presenta la reflectancia de distintos materiales y colores, los materiales son los comúnmente utilizados en fachadas, los datos son obtenidos de los autores Venegas y Piderit (2018).

Tabla 2.7 Reflectancia de distintas superficies.
Fuente: Venegas y Piderit 2018

Superficies artificiales	Reflectancia %
Asfalto	5-10
Pinturas oscuras	10-20
Ladrillo rojo, hormigón medio	20-30
Hormigón claro, acero galvanizado	30-40
Pinturas colores medios y grises	40-50
Mármol, acero inoxidable	50-60
Pintura colores claros	60-70
Pintura blanca	70-80
Cal, yeso, aluminio pulido	80-90

2.4 Caso de estudio

La selección del caso de estudio se realizó partiendo de una habitación de hospital de uso común, sin requerimientos especiales, ubicada en un edificio representativo en una zona con alto requerimiento de enfriamiento para su operación.

2.4.1 Habitación tipo hospital

En esta sección se presenta el caso de estudio, para lo cual, se seleccionó una habitación de un edificio no residencial, en la que, la habitación del edificio se contempla para uso de tipo hospital. Las especificaciones de la habitación y de la edificación cubren los requerimientos de la NOM-008-ENER-2001 (referente a eficiencia energética de edificios no-residenciales), a la NOM-016-SSA3-2012 (referente a infraestructura y equipamiento de hospitales y consultorios de atención médica especializada) y el estudio de eficiencia energética en hospitales (2015). Para la habitación, se puede considerar, por ejemplo, una habitación del área de atención, valoración, preparación, vigilancia y atención de la mujer embarazada, en donde las condiciones climáticas no son críticas. Las consideraciones de la habitación para la simulación son: densidad ocupacional de 9 m^2 por persona, ganancias internas por equipo de cómputo 50 W , ganancias por iluminación de 14 W/m^2 , tomando en cuenta, lo establecido en la norma mexicana NOM-007-ENER-2014 (Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales), el tiempo de operación para la habitación es de 24 horas de lunes a domingo. Para la evaluación del confort térmico, tomando en cuenta el tipo de habitación, se considera un factor de arropamiento promedio de 0.7 clo , el cual puede variar de acuerdo con la estación del año; la tasa metabólica se considera de 1 met para trabajo sentado/relajado y una velocidad del aire de 0.2 m/s , de acuerdo a la norma ISO 7730.

2.4.2 Edificio donde se ubica la habitación de estudio

En la **Figura 2.8** se muestra esquemáticamente la edificación con base al estudio de Álvarez *et al.* (2014), considerando la norma mexicana NOM-008-ENER-2001 para edificios no residenciales. La relación de aspecto de la edificación es 01:01, con 25 m de cada lado. Por su parte, la habitación se selecciona dividiendo la edificación en 12 zonas térmicas, considerando un total de cuatro habitaciones por piso, posterior, se selecciona la habitación con mayor cantidad de carga térmica de enfriamiento.

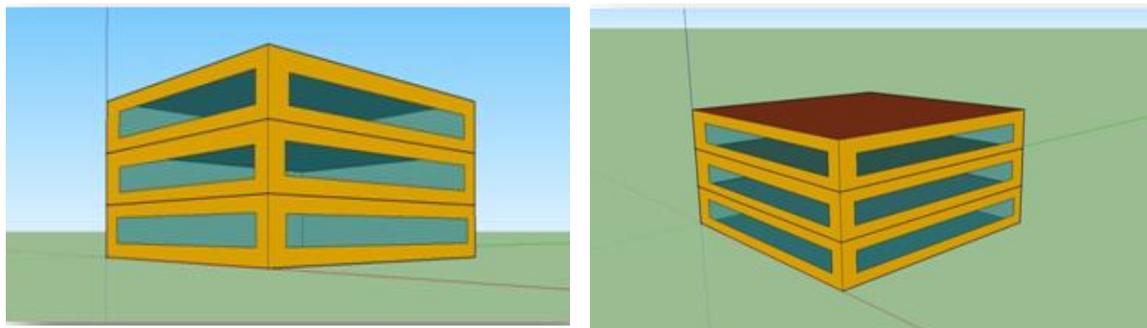


Figura 2.8 Edificio de referencia.

Cada piso tiene una superficie de 625 m^2 y una relación ventana-pared de 40%. El sistema de climatización funciona durante las horas de ocupación de 08:00 a 22:00 horas de lunes a viernes. En la **Tabla 2.8** se muestran los parámetros de entrada que se introducen en la simulación, de acuerdo a lo reportado con Álvarez *et al.* (2014).

Tabla 2.8 Descripción de los parámetros de entrada para la edificación de referencia.

Descripción	Valor
Número de pisos	3
Área del edificio	1875 m^2
Altura entre piso	4 m
Área por piso	625 m^2
Relación de aspecto	01:01
Nivel de iluminación	16 W/m^2
Contactos	8 W/m^2
Densidad ocupacional	9 m^2 por persona
Índice de ventilación	$0.46 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2$
Albedo Pared	0.25
Albedo techo	0.25
Horas de ocupación	8:00-22:00 (lunes-viernes)
Set point temperatura	25.0°C
Relación ventana-pared	40%

La temperatura de referencia (*Set point*) es de 25.0°C y el albedo de las paredes exteriores y el techo de 0.25 de acuerdo con la NOM-008-ENER-2001. En la **Tabla 2.9** se muestran las características de los materiales de construcción de la edificación. Las paredes se componen principalmente de tabique rojo (ladrillo), y el techo de hormigón con recubrimiento impermeable en el exterior. Los pisos son de losa de hormigón con terminados de azulejo. Las ventanas son de marco de aluminio y vidrios claro de 4 mm.

Tabla 2.9 Materiales de construcción, dimensiones y propiedades termo-físicas.

Elementos envolvente	Materiales	Espesor (m)	Conductividad (kJ/hmK)	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kg·K)
Muros	Mortero	0.015	2.5956	1890	0.837
	Ladrillo	0.14	2.9304	1600	0.8
	Yeso	0.015	1.35	800	1
Techo	Impermeabilizante	0.02	0.612	1127	0.8
	Concreto	0.1	6.264	2300	0.84
	Yeso	0.015	1.35	800	1
Piso planta baja	Concreto	0.1	6.264	2300	0.84
	Loseta	0.01	4.0896	2600	0.795
	Yeso	0.015	1.35	800	1
Piso planta alta	Concreto	0.1	6.264	2300	0.84
	Loseta	0.01	4.0896	2600	0.795

Ubicación de la habitación en la edificación

La edificación de referencia se dividió en 12 zonas térmicas para la evaluación de la habitación de estudio. La habitación de estudio se seleccionó considerando la zona con mayor cantidad de carga térmica de enfriamiento de las 12 zonas del edificio de referencia. En la **Figura 2.9** se muestra la configuración del interior del edificio de referencia. La edificación cuenta con tres pisos, cada piso presenta la misma configuración, son cuatro habitaciones de 4 m de alto, 12.5 m de largo de cada lado. Las ventanas se ubican en todas las orientaciones, con una proporción ventana-pared del 40% en cada orientación. En la **Figura 2.9** se presenta; a) la división de las adyacencias de las zonas térmicas del edificio de referencia y b) configuración de la fachada de cada zona térmica.

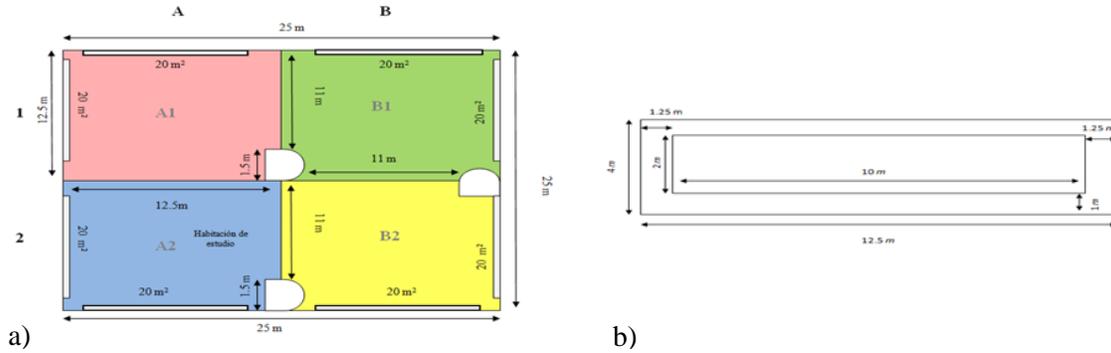


Figura 2.9 Configuración de la edificación de estudio, a) zonas térmicas y b) fachadas.

En la **Tabla 2.10** se presentan las zonas térmicas de cada piso, las cuales se dividieron en cuatro zonas para cada piso.

Tabla 2.10 Zonas térmicas del edificio de referencia.

Piso 1	Piso 2	Piso 3
A1-P1	A1-P2	A1-P3
A2-P1	A2-P2	A2-P3
B2-P1	B2-P2	B2-P3
B1-P1	B1-P2	B1-P3

En la **Figura 2.10** se presenta la carga térmica de enfriamiento de cada zona térmica del edificio. Las zonas térmicas cuentan con aire acondicionado y una temperatura operativa de 25.0°C, todas las zonas térmicas presentan las mismas condiciones, para la selección de la habitación de estudio, no cuentan con ganancias de calor por personas o equipos.

La zona con mayor carga térmica es la zona A2-P3 con 37 *MWh-año*, por lo tanto, para el estudio, la zona A2 del piso 3, es la seleccionada para el estudio.

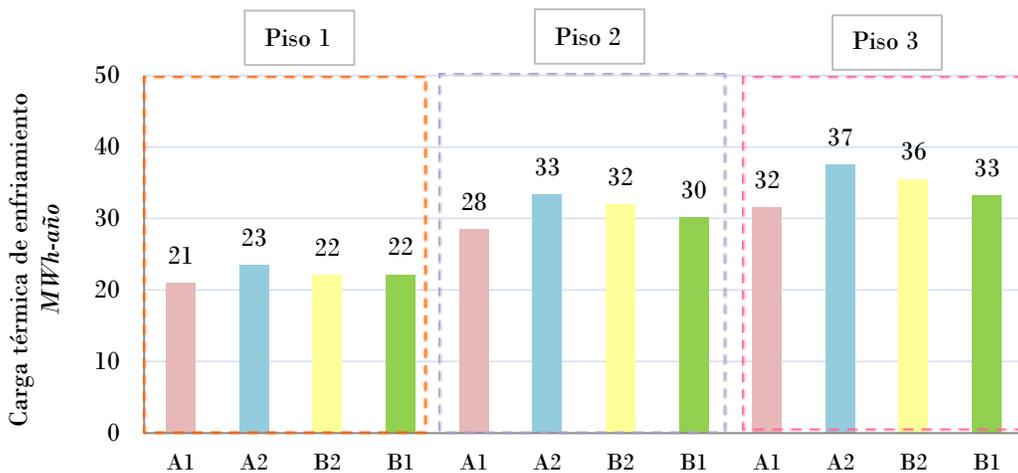


Figura 2.10 Carga térmica de enfriamiento de las distintas zonas del edificio de referencia, para la ciudad de Monterrey.

2.4.3 Selección de la localidad de estudio

En la **Figura 2.11** se muestra la metodología de selección de la localidad de estudio, en donde, en lo general se considera tres rubros, resaltando el tipo de edificio, la superficie utilizada y el número de habitantes; en lo energético, el consumo eléctrico, la región climática y el potencial de enfriamiento; y en lo económico, se considera únicamente el producto interno bruto.

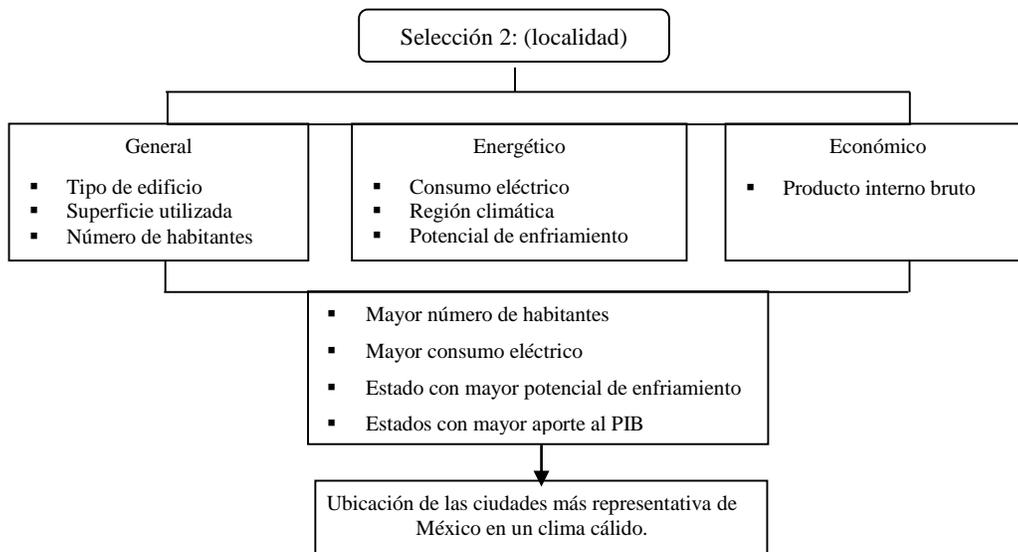


Figura 2.11 Metodología de la localidad de estudio.

En la **Tabla 2.11** se muestra el potencial de enfriamiento por metro cuadrado de diferentes zonas de la República Mexicana.

Tabla 2.11 Cargas térmicas por metro cuadrado en distintas zonas de México.

Zona	0-8 m ²	8-16 m ²	16-25 m ²	25-30 m ²
1	2.05 kWh	3.22 kWh	4.68 kWh	7.03 kWh
	Nayarit Jalisco Colima Zacatecas Aguascalientes Guanajuato Tlaxcala			
2	1.84 kWh	2.90 kWh	4.22 kWh	6.33 kWh
	Michoacán Edo. De México Hidalgo Puebla Morelos Querétaro CDMX			
3	2.25 kWh	3.54 kWh	5.15 kWh	7.73 kWh
	Baja californiasur Tamaulipas San Luis Potosí Veracruz Guerrero Oaxaca			
4	2.46 kWh	3.86 kWh	5.63 kWh	8.44 kWh
	Sonora Chihuahua Coahuila Nuevo León Baja California Norte Sinaloa Durango Tabasco Chiapas Campeche Quintana Roo Yucatán			

En la **Tabla 2.12** se muestran los estados más representativos de México, de acuerdo con el número de habitantes, el potencial de enfriamiento, el PIB y el consumo eléctrico. En este primer filtro se seleccionaron los estados más representativos.

Tabla 2.12 Estados de la República Mexicana con mayor potencial de enfriamiento y consumo eléctrico.

Ciudad	Núm. Habitación	$kWh-m^2$	Potencial de enfriamiento	PIB	Consumo eléctrico
CDMX	8,000	3.17	25,322	17	3,174,790
Edo. Méx.	4,142	3.17	13,109	8.9	4,904,165
Nuevo León	1,798	4.22	7,587	7.3	1,926,892
Jalisco	3,323	3.51	11,687	7.1	2,939,787
Veracruz	2,555	3.86	9,884	4.7	2,800,586

El segundo filtro que se realizó se consideró tomando en cuenta el primer filtro, en el cual se presentan los estados más representativos, los cuales son Nuevo León y Veracruz. En la **Tabla 2.13** y **2.14** se presentan los municipios más representativos de estos dos estados, en donde se menciona el número de habitantes, consumo energético, tipo de clima y PIB.

Tabla 2.13 Selección de la ciudad de estudio del estado de Nuevo León.

Municipio	Habitantes	Consumo energético MWh	Tipo de clima	PIB
Apodaca	597,207	207,977	Semi-cálido	7.60
Guadalupe	682,880	224,036	Cálido semi-seco	13.30
Monterrey	1,109,171	410,981	Cálido seco	35.70
San Nicolás	430,143	144,478	Semiseco templado	9.60

Tabla 2.14 Selección de la ciudad de estudio del estado de Veracruz.

Municipio	Habitantes	Consumo energético MWh	Tipo de clima	PIB
Xalapa	480,841	213,732	Templado	9.30
Coatzacoalcos	319,187	145,766	Cálido húmedo	8.60
Poza Rica de Hidalgo	200,119	89,054	Cálido subhúmedo	5.20
Córdoba	218,153	84,570	Cálido húmedo	5.10

Los municipios más representativos de Nuevo León y Veracruz son Monterrey y Coatzacoalcos, respectivamente, por lo que, son las ciudades seleccionadas para este estudio. En la **Figura 2.12** se presenta el comportamiento de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la *HR*, en promedios mensuales a lo largo del año para Monterrey y

Coatzacoalcos. Es de observarse, que los meses con la temperatura más alta, para monterrey son julio y agosto, mientras que para Coatzacoalcos son mayo y junio.

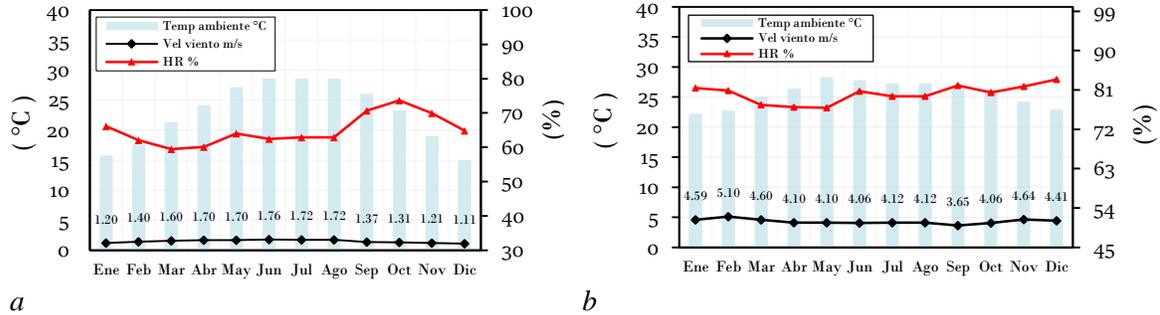


Figura 2.12 Temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad relativa de a) Monterrey y b) Coatzacoalcos.

Monterrey

La ciudad de Monterrey se encuentra ubicada a 25° 20' 30.3" N y 100° 19' 6.5" O, su población total es de 4,190,544 habitantes. Es un Municipio y ciudad capital del Estado de Nuevo León, ubicado al noreste de México, con una extensión territorial que asciende a 451.30 km², con una altitud promedio de 500 metros sobre el nivel del mar. Está limitado al norte con los municipios de San Nicolás de los Garza y General Escobedo; al sur con los municipios de San Pedro Garza García y Santiago; al este con Guadalupe Juárez y Cadereyta; y al oeste con Santa Catarina y García. El clima es semiárido cálido (*Bsh*) de acuerdo con la clasificación climática de Köppen y Geiger. En la **Tabla 2.15** se presentan los mínimos, máximos y promedios diarios de la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del aire, para la ciudad de Monterrey. Es de observarse, que, la temperatura más alta es de 40.07°C y la mínima de 2.50°C, mientras que la humedad relativa más alta es de hasta 65.09%. La temperatura promedio diaria es de 22.89°C, la humedad relativa de 65.09% y la velocidad del aire de 1.50 m/s.

Tabla 2.15 Parámetros climáticos de la ciudad de Monterrey.

Parámetros climáticos	Temperatura del aire (°C)	HR (%)	Velocidad del aire (m/s)
Min	2.50	22.50	0.00
Max	40.07	100.00	7.50
Prom	22.89	65.09	1.50

Coatzacoalcos

La ciudad de Coatzacoalcos se encuentra ubicada a $18^{\circ} 8' 16''$ N y $94^{\circ} 26' 7''$ O, su población total es de 370,000 habitantes. Es una ciudad y uno de los puertos más importantes del sur de México, ubicada en el estado de Veracruz. Con una extensión territorial que asciende a 313.07 km^2 , con una altitud promedio de 10 metros sobre el nivel del mar. Está limitado al oeste con el municipio de Pajapan, al sur con el municipio de Cosoleacaque, al norte con el Golfo de México y al este con el estado de Tabasco. El tipo de clima es tropical (*Am*) según la clasificación climática de Köppen y Geiger. En la **Tabla 2.16** se presentan los mínimos, máximos y promedios diarios de los parámetros climáticos; temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del aire, para la ciudad de Coatzacoalcos. Es de observarse, que, la temperatura más alta es de 36.32°C y la mínima de 13.89°C , mientras que la humedad relativa más alta es de hasta 100%. La temperatura promedio diaria es de 25.61°C , la humedad relativa de 80.24% y la velocidad del aire de 4.30 m/s .

Tabla 2.16 Parámetros climáticos de la ciudad de Coatzacoalcos.

Parámetros climáticos	Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)	HR (%)	Velocidad del aire (m/s)
Min	13.89	49.50	0.15
Max	36.32	100.00	13.95
Prom	25.61	80.24	4.30

2.5 Metodología

En este apartado, se presenta, la física del problema, la estrategia de optimización energética, la metodología del estudio económico y la metodología del confort térmico.

2.5.1 Física del problema

En la **Figura 2.13** se muestra de manera general la formación de un microclima dentro de una edificación. El volumen de control VC, en sí está limitado por la envolvente de la edificación, constituida por paredes, puertas, ventanas, piso y techo expuestos al ambiente, a una temperatura T_{amb} . Durante el día, la fuente de calor (sol) actúa sobre el volumen de control (edificación) suministrando un flujo de energía Q_{sol} , que provoca un incremento de temperatura en la envolvente, debido a que se almacena calor en la envolvente, llegando a tener temperatura T_{env} . La energía almacenada eleva la temperatura de las ventanas, puertas techo y las paredes, por lo que la envolvente transfiere calor hacia el interior de la habitación Q_{in} y exterior Q_{ex} , estos flujos de calor provocan una temperatura de habitación T_{room} . Durante la noche, la envolvente y en sí la edificación, transfieren calor al ambiente. Con la energía almacenada en la edificación Q_{alm} , los flujos de calor del ambiente hacia el interior durante el día y del interior hacia el exterior durante la noche, se forma el microclima dentro de la habitación a temperatura T_{room} . Es de observar que los métodos pasivos permiten controlar los flujos de calor Q_{in} , Q_{ex} y Q_{alm} para estabilizar y mantener en un intervalo adecuado la T_{room} .

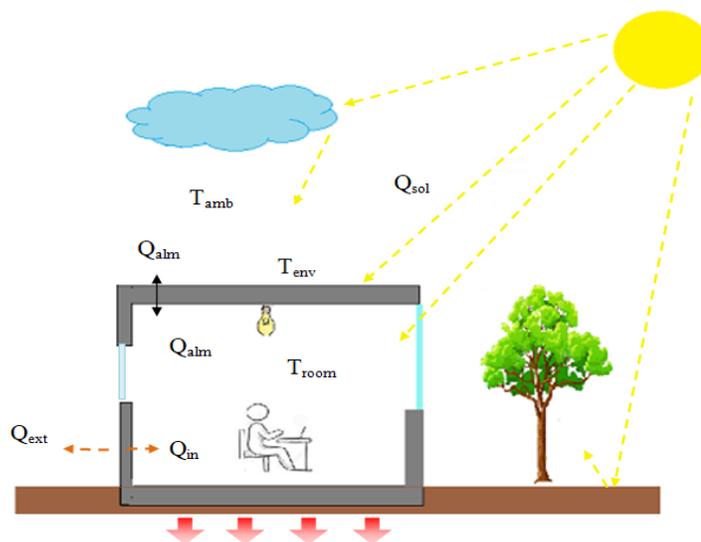


Figura 2.13 Formación de un microclima en una edificación.

Balance energético para el interior de la habitación

El cambio de temperatura en el interior del edificio en función del tiempo, sin transferencia de masa, viene dado por la **Ec. 2.17**.

$$\frac{dT_{room}}{dt} = \frac{Q_{sol}}{(mCp)_{room}} \quad (2.17)$$

donde m es la masa del aire contenido en interior del edificio y Q_{sol} es el flujo de calor solar transferido al interior del edificio a través de los elementos de la envolvente, este dado por la **Ec. 2.18**.

$$Q = \sum h_{room}(T_{env} - T_{room})A + \sum Q_{int} \quad (2.18)$$

donde T_{env} y A son la temperatura de la envolvente y el área del elemento de la envolvente, respectivamente; mientras que Q_{int} es el flujo de calor interior de la habitación, que viene dado por personas o dispositivos electrónicos.

La ganancia solar para la temperatura de la superficie de la envolvente está dada por la **Ec. 2.19**.

$$Q_{sol} = Q_{in} + Q_{sol, w} + Q_{rad} + Q_{env-g} \quad (2.19)$$

donde Q_{in} son las ganancias solares internas recibidas por las paredes, $Q_{sol, w}$ es el intercambio de radiación de onda larga entre paredes y ventanas, Q_{env-g} es el flujo de calor especificado por el usuario a la superficie de la pared o ventana.

2.5.2 Optimización en la climatización de la habitación hacia cero energías convencionales

En la **Figura 2.14** se presenta la metodología de optimización energética de la habitación de un edificio de hospital, teniendo como fin el acercamiento hacia cero energías convencionales en la climatización. La optimización se divide en el suministro de parámetros de entrada, el proceso de optimización y en la obtención de parámetros de salida.

Los parámetros de entrada que se consideran son; las propiedades termo-físicas de los materiales de la habitación, los parámetros meteorológicos del lugar de estudio y las estrategias de mitigación de consumo energético en la climatización, en conjunto con los modelos de confort térmico adaptativo. En el proceso de optimización se aborda la construcción de la estrategia de reducción energética, para lo cual, se construye un modelo basado en balances de energía, que se utiliza para la construcción de un simulador, el cual se verifica comparando sus resultados con el trabajo de Álvarez *et al.* (2014). Una vez verificada la plataforma de simulación de acuerdo con el edificio de referencia de la NOM-008-ENER-2001, se procede a la simulación de una habitación en la edificación, implementando estrategias de mitigación energéticas de climatización y modelos de confort térmico adaptativo. Las estrategias de mitigación energéticas se implementan en la habitación para llegar a lo más cercano a cero energías en la climatización. El comparativo de la factibilidad de llegar a cero energías convencionales en la habitación de estudio, se realiza en términos del consumo energético y los costos económicos asociados anuales. El análisis térmico se realiza en términos de las cargas térmicas de enfriamiento y el confort térmico de los ocupantes. Los parámetros de salida se presentan como; la reducción de la carga térmica en una habitación de hospital, lista priorizada de la sensibilidad de las cargas térmicas a cada estrategia y las recomendaciones a la normatividad mexicana para implementar diseños bioclimáticos en edificios no residenciales de México.

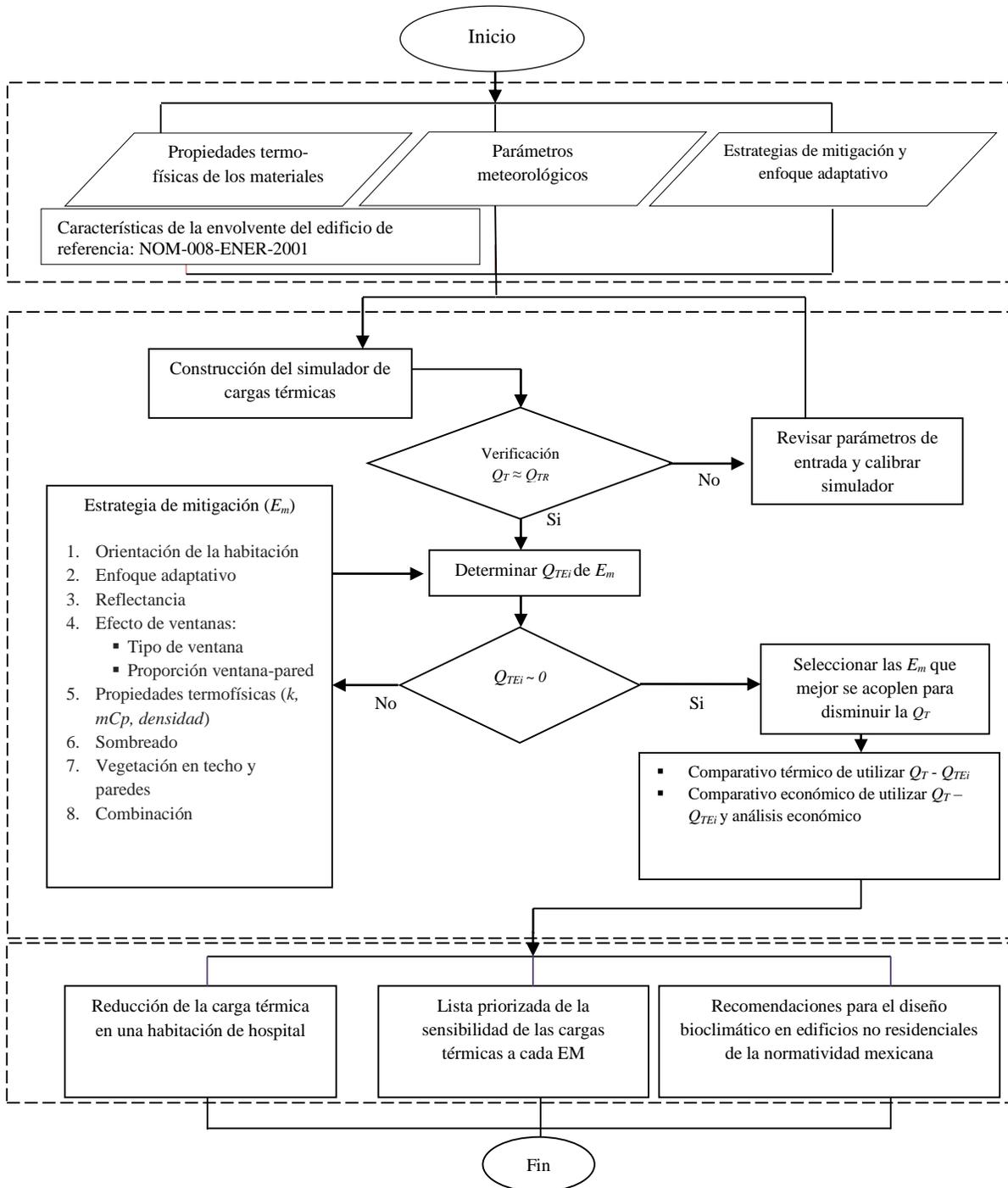


Figura 2.14 Optimización de habitación climatizada con el mínimo de energías convencionales.

2.6 Estudio económico

En la **Figura 2.15** se presenta la metodología del análisis económico para la climatización de la habitación con estrategias de mitigación de consumo energético, en relación con una habitación climatizada convencionalmente. La carga térmica anual de la edificación sin estrategias de mitigación energética (Q_T) se determina para tener un caso de referencia para realizar el comparativo económico. La carga térmica de enfriamiento con estrategias de mitigación (Q_{TEi}) se realiza para un determinado caso de estudio. La carga térmica Q_T y Q_{TEi} se convierten en carga eléctrica considerando un coeficiente de rendimiento (COP) de 2.5. La tarifa en el edificio de referencia es de tipo Gran Demanda de Media Tensión Ordinaria ($GDMTO$), que aplica para una demanda menor de 100 kW_e , el costo de la energía para Monterrey es de $\$1.13\text{ KWh}$ y para Coahuila de Zaragoza es de $\$1.17\text{ KWh}$. El costo de la energía se calcula multiplicando la Q_T y Q_{TEi} -eléctricos por el costo de la energía para cada ciudad, considerando el impuesto sobre el valor añadido (IVA) del 16%. El ahorro neto o flujo de caja se determina restando el costo de la energía de (Q_{TEi}) a (Q_T). Para tener un enfoque más completo, se utilizan indicadores económicos los cuales son el VAN , la TIR y el periodo de recuperación de la inversión y se tienen en cuenta todos los gastos futuros del costo de la energía ahorrada. La inversión se determina sumando los costos totales que se ocuparan para el diseño de la habitación con Q_{TEi} y posterior, restándole el costo por la Q_T de la habitación convencional.

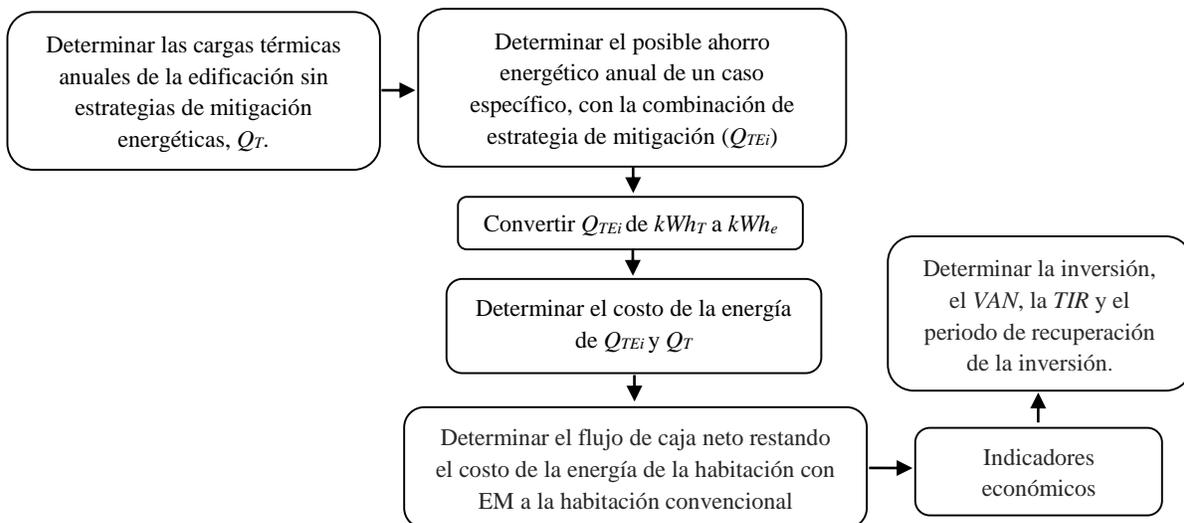


Figura 2.15 Metodología para determinar el comparativo económico.

2.6.1 Valor Actual Neto

El Valor Actual Neto (*VAN*) es un indicador económico para evaluar proyectos de inversión, el *VAN* indica si la inversión es viable, además, de saber qué inversión es mejor que otra en términos absolutos. El *VAN* consiste en actualizar mediante una tasa de descuento todos los flujos de caja futuros. La tasa de descuento se considera del (10%) de acuerdo con lo recomendado por la secretaría de energía. El *VAN* se determina con la **Ec. 2.20**.

$$VAN = \frac{f_t}{(1+d)^N} \quad (2.20)$$

donde f_t es el flujo de caja en cada periodo, N es el periodo de la inversión en años y d es la tasa de descuento del mercado. Los criterios de decisión son los siguientes:

***VAN* > 0:** El proyecto es rentable.

***VAN* = 0:** El proyecto no generará beneficios ni pérdidas.

***VAN* < 0:** El proyecto generará pérdidas.

2.6.2 Tasa interna de retorno

La Tasa Interna de Retorno (*TIR*) es un indicador económico que permite determinar la rentabilidad que ofrece una inversión, es decir, nos indica el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. La *TIR* está muy relacionada con el *VAN* y también se define como la tasa de descuento que hace que el *VAN* sea igual a cero, para un proyecto de inversión dado. La *TIR* se puede calcular con la **Ec. 2.21** a partir de los flujos de efectivo anuales y de la inversión inicial del proyecto.

$$VAN = 0 = -I_0 + \sum_{N=1}^N \frac{f_t}{(1+TIR)^N} \quad (2.21)$$

donde f_t es el flujo de caja en cada periodo, I_0 es la inversión inicial, N es el periodo de la inversión en años.

2.6.3 Tiempo de recuperación de la inversión

El tiempo de recuperación de la inversión (*TR*) o Payback time, es el tiempo necesario para que el flujo de caja anual sea positivo. El tiempo de recuperación descontado es un método de valoración de inversiones que determina el tiempo que una inversión tarda en recuperar el

desembolso inicial, con los flujos de caja actualizados. El tiempo de recuperación de la inversión se calcula con la **Ec. 2.22**.

$$TR = N_{(N-1)} + \frac{f_{(f-1)}}{f_t} \tag{2.22}$$

donde $N_{(N-1)}$ es el periodo inmediato anterior en el que se recupera la inversión, $f_{(f-1)}$ es el flujo de caja acumulado del año inmediato anterior en el que se recupera la inversión y f_t es el flujo de caja del año en el que se recupera la inversión.

2.7 Evaluación del confort térmico

El confort térmico se determina en términos del *PMV* (Voto medio predicho) y *PPD* (Porcentaje de personas insatisfechas). Los parámetros que afectan el confort térmico se mencionan en la **Sección 2.2.1**. En la **Figura 2.16** se presenta un diagrama general para la evaluación del confort térmico. Los parámetros de entrada para el cálculo de los criterios de confort térmico son: factor de ropa (*clo*), tasa metabólica (*met*) y la velocidad del aire (*m/s*). El proceso para determinar las salidas se calcula en una subrutina de TRNSYS para el modelado de edificios (TRNBuild), el cálculo se basa en el estándar ISO 7730, con la **Ec. 2.7** y **Ec. 2.11** que se muestran en la **Sección 2.2.2**. Las salidas para determinar si el entorno térmico cumple con los criterios de confort son el *PMV* y el *PPD*.

La habitación de estudio es de tipo hospital, por lo tanto, el nivel de arropamiento promedio es de 0.7 *clo*, el cual puede variar de acuerdo a la estación del año, debido a que, la modificación de la ropa puede contribuir a equilibrar las diferencias individuales según la norma ISO 7730; la tasa metabólica se considera de 1 *met* para trabajo sentado/relajado y una velocidad del aire de 0.2 *m/s*, de acuerdo a la norma ISO 7730.

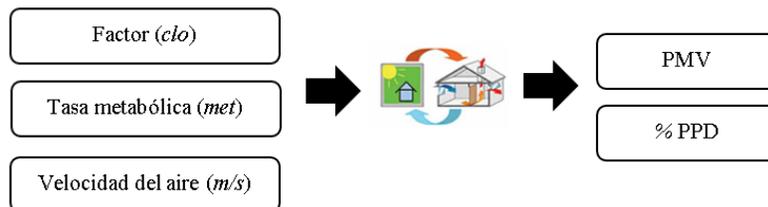


Figura 2.16 Evaluación del confort térmico.

Capítulo 3

Capítulo 3: Estrategia de mitigación energética en la climatización

En este capítulo se presentan las estrategias de mitigación energética en la climatización y la construcción de la plataforma de simulación, así como la verificación.

3.1 Estrategias de mitigación energética

En esta sección se presentan las estrategias de climatización que se utilizan en el proceso de optimización para llegar hacia cero energías convencionales en la climatización de una habitación tipo hospital. El edificio que se utiliza como caso base es un edificio no-residencial considerando el cumplimiento de la norma mexicana NOM-008-ENER-2001, el cual se presenta en la **Sección 2.4.2**.

3.1.1 Orientación de la habitación

La optimización energética considerando la orientación se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual, variando el ángulo acimut de la superficie de -180 a 180°, como se indica en **Ec. 3.1**.

$$Q_{teanual-min} = f(\gamma_s); \quad -180 \leq \gamma_s \leq 180 \quad (3.1)$$

Para el cálculo del ahorro de la energía anual, se considera como referencia la orientación sur con un ángulo de (0°).

3.1.2 Enfoque adaptativo

La optimización energética con los modelos de confort térmico adaptativo se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual, variando los modelos de confort térmico que se muestran en la **Tabla 3.1**, en función de la temperatura de confort.

Tabla 3.1 Modelos de confort térmico adaptativo.

i	Norma/Autor	Modelo
1	NOM-008-ENER-2001	25.0°C
2	Yau y Chew (2013)	$T_{conf} = 0.33 \cdot T_{out} + 14.50$
3	GUÍA A CIBSE	$T_{conf} = 0.09 \cdot T_{rm} + 22.60$
4	López <i>et al.</i> 2019 (local)	$T_{conf} = 0.13 \cdot T_{rm} + 22.70$

El modelo para determinar la optimización energética variando los modelos de confort de $i=1,2 \dots 4$ se presenta en la **Ec. 3.2**.

$$Q_{tanual-min} = f(T_{conf\ i}); \quad i=1,2\dots 4 \quad (3.2)$$

donde T_{conf} es de la forma **Ec. 3.3**.

$$T_{conf} = a \cdot T_{rm} + b \quad (3.3)$$

donde T_{conf} es la temperatura de confort, a y b son coeficientes y T_{rm} es la temperatura radiante media que se calcula con la **Ec. 3.4**.

$$T_{rm(hoy)} = (\alpha) \cdot T_{rm(ayer)} + (1-\alpha)T_m \quad (3.4)$$

donde $T_{rm(hoy)}$ y $T_{rm(ayer)}$ representan la temperatura media de corriente libre para el día de hoy y ayer en grados Celsius, respectivamente, T_m es la temperatura media exterior del día, la cual se obtiene de la base de datos de Meteonorm, α es una constante en el rango (0-1), donde el valor recomendado es 0.8. La temperatura de confort se ingresa a la plataforma de simulación mediante una subrutina (Type 9c) del software TRNSYS, que sirve para ingresar la base de datos de la T_{conf} diaria en formato Excel.

Para el cálculo del ahorro de energía anual, se considera como referencia una temperatura operativa de 25°C de acuerdo con la NOM-008-ENER-2001.

3.1.3 Reflectancia

La optimización energética en función de la reflectancia, se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual variando el rango de 0.1-0.9 con intervalos de 0.1, **Ec. 3.5** (Álvarez *et al.*, 2014).

$$Q_{tanual-min} = f(\rho); \quad \rho = 0.1 - 0.9 \quad (3.5)$$

Para el cálculo del ahorro de energía anual, se considera como referencia una reflectancia de 0.3, de acuerdo a la norma NOM-008-ENER-2001.

3.1.4 Efecto de la ventana: tipo de ventana y proporción ventana-pared.

El efecto de las ventanas se determina variando el tipo de ventanas y cambiando la proporción ventana-pared (WWR) de la habitación de estudio.

Tipo de ventanas

La optimización energética con el tipo de ventana para la edificación se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual variando el tipo de ventana, el modelo para la optimización energética variando (V_i) de $i=1,2 \dots 9$, se presenta con la **Ec. 3.6**.

$$Q_{\text{tanual-min}} = f(V_i); \quad i=1,2 \dots 9 \quad (3.6)$$

En la **Tabla 3.2**, se presentan las características de los diferentes tipos de ventanas utilizadas, donde la cuarta columna corresponde al Valor-U o coeficiente global de transferencia de calor, el cual se puede definir como la tasa de transferencia de calor a través de una ventana. La última columna, presenta el valor del coeficiente de ganancia de calor solar (SHGC) el cual se refiere a la fracción de la irradiancia incidente que ingresa a través de la ventana y se convierte en ganancia de calor solar (Hernández *et al.*, 2013).

Tabla 3.2 Tipos de ventanas.

Ventana	Acristalamiento	Composición (mm)	Valor-U (W/m^2K)	SHGC
V ₁	1 vidrio claro	4	5.70	0.75
V ₂	Doble vidrio claro	4/16/4	2.80	0.75
V ₃	Doble Low-e	3/12.5/2.5	1.76	0.59
V ₄	Simple control solar	6	5.76	0.48
V ₅	Doble control solar	6/8/6	2.76	0.40
V ₆	Doble Low-SHGC	6/16/6	1.26	0.39
V ₇	Planisol neutral	6/16/6	1.16	0.36
V ₈	Doble Low- SHGC, Ar, silber	4/16/6	1.30	0.29
V ₉	Doble Low- SHGC, Ar, gold	6/16/6	1.26	0.21

El caso base se utiliza para cuantificar el ahorro, el cual es una ventana simple de vidrio claro de 4 mm con un U -value de $5.7 W/m^2K$ y un coeficiente de ganancia de calor solar de 0.75.

Proporción ventana-pared

La optimización energética con la proporción ventana-pared (WWR), se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual de la habitación de estudio variando la proporción ventana-pared de 5-99% con intervalos de 5% (Tzempelikos y Athienitis, 2007) se presenta en la **Ec. 3.7**.

$$Q_{teanual-min} = f(WWRi); \quad i = 5,10 \dots 99\% \quad (3.7)$$

La habitación de estudio cuenta con dos paredes exteriores las cuales están orientadas hacia el sur y oeste, el área de cada una es de 50 m² y para la evaluación se consideran las dos paredes con su respectiva proporción ventana-pared. En la **Tabla 3.3** se presenta la WWR y el área de acristalamiento.

Tabla 3.3 Proporción ventana-pared y área de acristalamiento.

WWR (%)	Área del acristalamiento (m ²)
5	2.5
10	5.0
15	7.5
20	10.0
25	12.5
30	15.0
35	17.5
40	20.0
45	22.5
50	25.0
55	27.5
60	30.0
65	32.5
70	35.0
75	37.5
80	40.0
85	42.5
90	45.0
95	47.5
99	49.9

Para el cálculo del ahorro de energía anual, se considera como referencia una WWR del 40%, para la orientación sur y la orientación oeste de la habitación de estudio.

3.1.5 Sombreado

La optimización energética con sombreado se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual, en función de la orientación de la ventana con sombreado (VSi) de la habitación de estudio, como se muestra en la **Ec. 3.8**. La (VSi) está en función de la orientación sur y oeste.

$$Q_{teanual-min} = f(VSi); \quad i = sur \text{ y } oeste \quad (3.8)$$

Para el cálculo del ahorro de energía anual, se considera como referencia las ventanas sin ningún tipo de sombreado.

3.1.6 Propiedades termo-físicas de los materiales

La optimización energética con las propiedades termo-físicas se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual variando los valores de las propiedades termo-físicas de cada material, como se muestra en la **Ec. 3.9**.

$$Q_{t\text{ anual-min}} = f(M - i); \quad i=1,2..4 \quad (3.9)$$

En la **Tabla 3.4** se muestran las propiedades termo-físicas de los materiales.

Tabla 3.4 Propiedades termo-físicas de los materiales.

Nombre	Material	Densidad (ρ) kg/m ³	Calor específico (C_p) kJ/kg·K	Conductividad térmica (k) kJ/h·m·K
M-1	Ladrillo	1600.00	0.800	2.900
M-2	Ladrillo arcilla	1800.00	1.050	2.916
M-3	Tabicón	1307.50	1.7487	3.351
M-4	Tepetate	1023.47	2.0171	2.338

Para el cálculo del ahorro de energía anual, se considera como referencia el ladrillo para las paredes, de acuerdo a la norma NOM-008-ENER-2001.

3.1.7 Vegetación

La optimización energética con la vegetación se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica en función de las paredes y techo de la habitación cubierta, considerando que la habitación de estudio cuenta con dos paredes al exterior y un techo, **Ec. 3.10**.

$$Q_{t\text{ anual-min}} = f(PTi); \quad i=1,2..4 \quad (3.10)$$

Para el cálculo del ahorro de energía anual, se considera como referencia, las paredes y el techo sin cubierta verde, utilizando los materiales convencionales. En la **Tabla 3.5** se presentan las combinaciones de pared y techo para determinar el ahorro.

Tabla 3.5 Combinaciones de materiales para pared y techo.

Nombre	Combinaciones			
	PT-1	PT-2	PT-3	PT-4
Pared	Convencional	Cubierta verde	Convencional	Cubierta verde
Techo	Convencional	Convencional	Cubierta verde	Cubierta verde

En la **Tabla 3.6** se presentan las propiedades de la envolvente que se utilizan para las configuraciones. La absorptancia de la cubierta verde es de 0.7, la planta es *Sedum lineare*, los datos se obtienen de Polo *et al.*, 2020 y Olivieri *et al.*, 2017.

Tabla 3.6 Propiedades de los materiales para cubierta convencional y cubierta verde.

	Material	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (kJ/h·m·K)	Calor específico (kJ/kg·K)
Pared convencional	Mortero	0.015	1890	2.90	0.837
	Ladrillo	0.140	1600	2.90	0.800
	Yeso	0.015	800	1.35	1.000
Techo convencional	Impermeabilizante	0.020	1127	0.61	0.800
	Concreto	0.100	2300	6.26	0.840
	Yeso	0.015	800	1.35	1.000
Pared verde	Mortero	0.015	1890	2.90	0.837
	Hormigón	0.15	2400	5.84	1.050
	Planta	0.06	582	1.26	4.800
	Sustrato	0.09	1200	3.60	0.840
	Aire	-	-	-	-
	Agua	0.010	1000	2.08	4.186
Techo verde	Impermeabilizante	0.020	1127	0.61	0.800
	Concreto	0.150	2300	6.26	0.840
	Planta	0.06	582	1.26	4.800
	Sustrato	0.09	1200	3.60	0.840
	Aire	-	-	-	-
	Agua	0.010	1000	2.08	4.186

3.1.8 Casos de estudio

Para la evaluación de la factibilidad, se determinan casos de estudio, en los cuales, se hace la integración de varias estrategias de mitigación energética, se evalúa y selecciona la configuración que genera una mayor disminución en la carga térmica de enfriamiento. En la **Tabla 3.7** se presentan las configuraciones de los casos y las estrategias de simulación utilizadas.

Tabla 3.7 Estrategias de mitigación utilizadas para los casos de estudio.

EM	Nombre	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
EM-1	Caso base	Si	-	-	-	-
EM-2	Materiales	-	-	-	-	-
EM-3	Sombreado	-	-	Si	-	-
EM-4	Tipo de ventana	-	Si	-	Si	-
EM-5	Reflectancia	-	Si	-	-	-
EM-6	WWR	-	Si	-	Si	Si
EM-7	Vegetación	-	-	Si	Si	-
EM-8	Orientación	-	Si	-	-	Si
EM-9	Adaptativo	-	Si	Si	Si	Si

3.2 Construcción de la plataforma de simulación

En este apartado se presenta la construcción de la plataforma de simulación, el edificio de referencia, el acoplamiento de la habitación de estudio y la verificación.

3.2.1 Edificio de referencia con tres zonas

La construcción de la plataforma de simulación se desarrolló mediante un modelo transitorio basado en balances de energía. El programa se construye basado en el método de análisis por componentes, utilizando subrutinas que permiten integrar cada parte de la edificación, donde se agregan los datos de entrada, y la exportación de los datos de las salidas. En el desarrollo del simulador se utiliza TRNSYS. En la **Figura 3.1** se presenta el diagrama del programa de evaluación de las cargas térmicas del edificio de referencia considerando el cumplimiento de la norma mexicana NOM-008-ENER-2001 (no-residencial) en donde, se presentan subrutinas utilizadas en el programa. La subrutina de manejo de datos climáticos del lugar, la subrutina TRNBuild que permite simular térmicamente la edificación de estudio y también se requieren de subrutinas para mostrar los resultados de manera gráfica, así como la subrutina para exportar datos en formato de Excel.

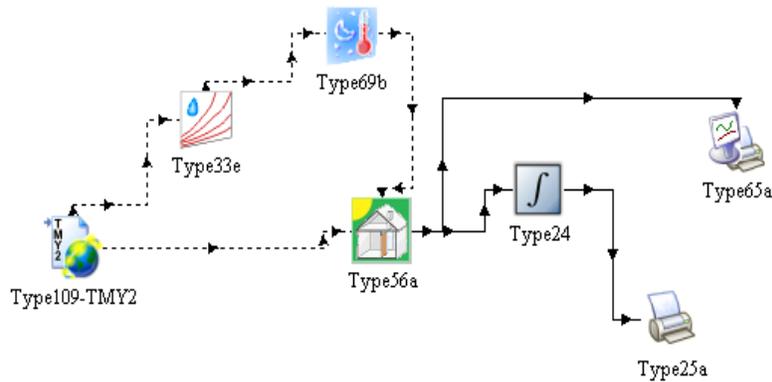


Figura 3.1 Diagrama del programa de evaluación de las cargas térmicas.

3.2.2 Acoplamiento de la habitación en el edificio de referencia

La habitación de estudio se describe en el **Sección 2.4.1**, la cual está ubicada en el tercer piso del edificio de referencia. La **Figura 3.2** muestra la plataforma de simulación desarrollada, con la integración de las 12 zonas térmicas de estudio. En la subrutina de TRNBuild se

modela el comportamiento térmico del edificio, en donde se describe a detalle cada zona térmica de la edificación.

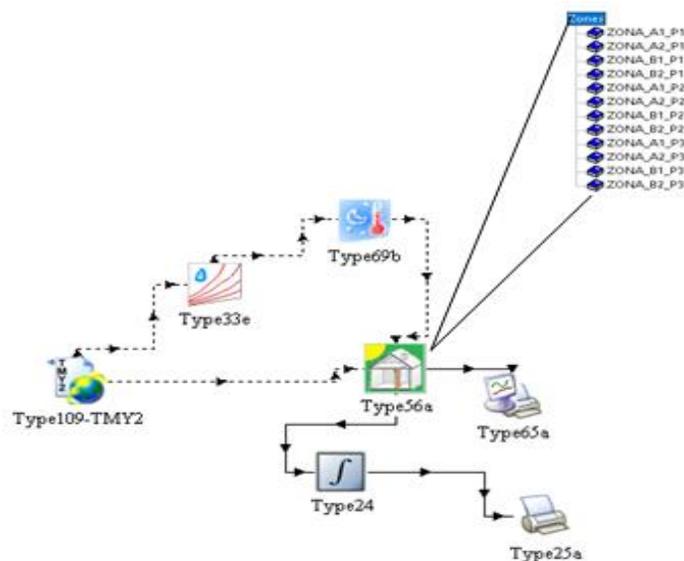


Figura 3.2 Diagrama del programa de evaluación, considerando las 12 zonas térmicas.

3.2.3 Verificación de la plataforma de simulación

La verificación consiste en comparar los resultados del simulador con los respectivos reportados por Álvarez *et al.*, (2014), considerando las cargas térmicas de enfriamiento del edificio y considerando el cumplimiento de la norma mexicana NOM-008-ENER-2001. En el comparativo se considera el edificio ubicado en cuatro ciudades (Villahermosa, Hermosillo, Monterrey y CDMX). Las características y configuración del edificio de la NOM-008-ENER-2001 se muestran en la **Sección 2.4.2**. La reflectancia de la edificación se fija en 0.5 en cuatro ciudades. También se hace un comparativo adicional cambiando la reflectancia de 0.1-0.9, con incrementos de 0.1, únicamente en el caso de Monterrey.

En la **Tabla 3.8** se presenta el comparativo cambiando las ciudades, donde se observa que, las cargas con menor diferencia se presentaron en los casos de Hermosillo y Monterrey, llegando a ser de hasta de 0.6%, mientras que el comparativo que presentó mayor diferencia fue el del caso de la CDMX, con una diferencia porcentual del 16.6%.

Tabla 3.8 Comparativo de la carga térmica de enfriamiento anual con lo reportado y el presente trabajo, para diferentes ciudades de México.

Ciudad	Carga térmica de enfriamiento <i>MWh-año</i>		
	Reportado	Presente trabajo	Diferencia %
Villahermosa	498.0	481.2	3.4
Hermosillo	430.5	424.1	1.5
Monterrey	346.9	344.9	0.6
CDMX	178.3	148.6	16.6

En la **Figura 3.3** se presenta el comparativo de las cargas térmicas, variando la reflectancia del techo. Es de observarse que la diferencia porcentual promedio es del 0.90%. La mayor diferencia en la carga térmica es de 5.75 *MWh -año* y la mínima de 0.18 *MWh -año* para una reflectancia de 0.8 y de 0.4 representando una diferencia porcentual en la carga térmica anual de 1.70% y 0.05%, respectivamente.

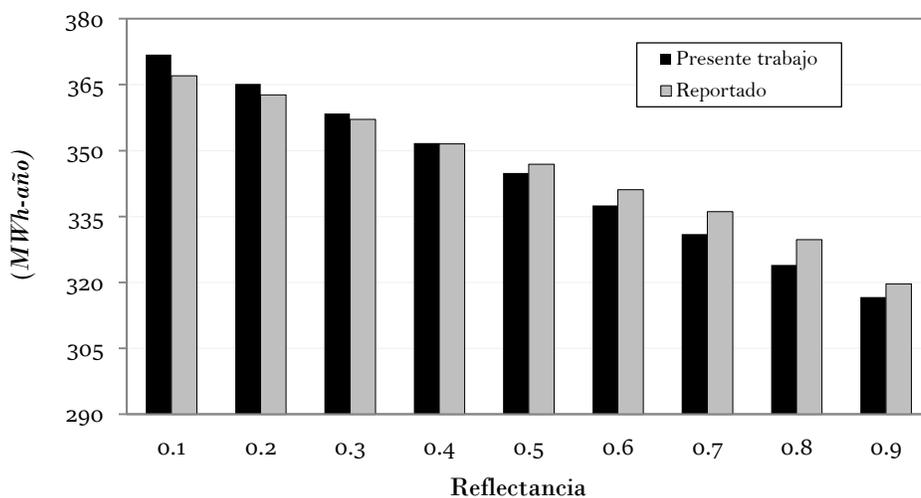


Figura 3.3 Comparativo de las cargas térmicas variando la reflectancia de 0.1-0.9 para Monterrey.

Los resultados derivados de la construcción del programa de simulación presentan una diferencia poco considerable respecto a lo reportado, lo que indica que la plataforma de simulación se encuentra funcionando de manera adecuada en términos de las cargas térmicas para la realización del estudio.

Capítulo 4

Capítulo 4: Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados del desempeño térmico de las estrategias de mitigación energética en la habitación de estudio y la factibilidad de climatización hacia cero energías convencionales.

4.1.2 Enfoque adaptativo

En la **Figura 4.2** se presenta el comparativo de la carga térmica de enfriamiento y los ahorros anuales, al utilizar modelos de confort térmico adaptativo para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey. El caso de referencia es una temperatura anual de 25.0°C con base a la norma mexicana NOM-008-ENER-2001. La carga térmica anual para el caso de referencia es de 88.04 y 72.17 *MWh-añuales* para la ciudad de Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. Con el modelo para hospitales, la carga de enfriamiento disminuyó a 76.54 y 67.17 *MWh-año* lo que representa ahorros de hasta el 13% en la carga térmica anual para Coatzacoalcos. El modelo adaptativo local disminuyó a 71.04 y 58.67 *MWh-año* para Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente, representando ahorros en la carga de enfriamiento del 19%. El modelo de la Guía A de CIBSE disminuyó la carga térmica de enfriamiento a 48.04 y 43.52 *MWh-año* representando ahorros del 45 y 40% en la carga térmica total anual, para Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. Es de observarse que, los modelos adaptativos ayudan a generar ahorros significativos en la carga térmica de enfriamiento.

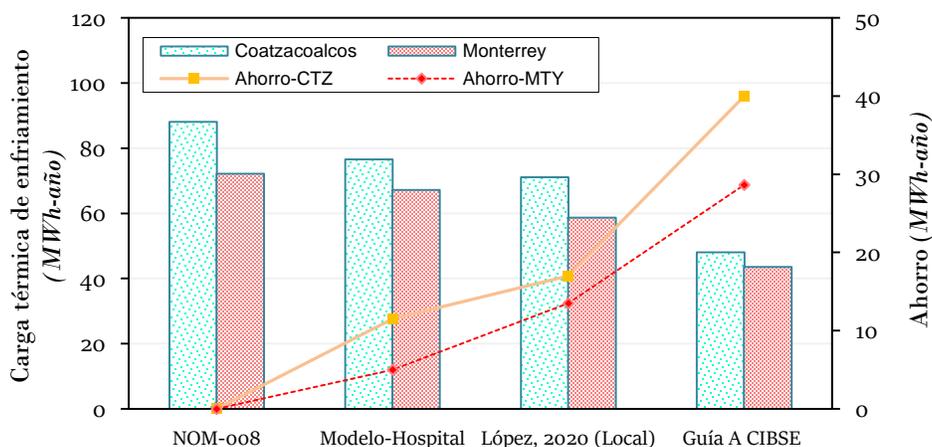


Figura 4.2 Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando modelos de confort térmico adaptativo, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.

4.1.3 Reflectancia

En la **Figura 4.3** se muestran las cargas térmicas de enfriamiento de la habitación de estudio y los ahorros al variar la reflectancia de 0.1 a 0.9 con intervalos de 0.1, para las ciudades de Monterrey y Coahuila de Zaragoza. El caso de referencia es un techo rojo con una reflectancia de 0.3, la carga térmica para la habitación de estudio es de 88.04 y 72.17 *MWh-año*, para Coahuila de Zaragoza y Monterrey, respectivamente. Es de observarse, que, al disminuir la reflectancia aumenta la carga térmica de enfriamiento, mientras que al aumentar la reflectancia disminuye. La carga térmica de enfriamiento disminuye al modificar la referencia a techo/pared con reflectancias por encima del caso base. La carga térmica con una reflectancia del 0.5 disminuye a 84.50 y 69.17 *MWh-año*, representando ahorros de hasta el 5%. Las reflectancias de 0.6, 0.7 y 0.8 (blancos), son las que ayudan a disminuir en mayor medida la carga térmica de enfriamiento, representando ahorros por encima de 4 *MWh- anuales* para Monterrey y Coahuila de Zaragoza. La carga térmica con reflectancias del 0.8 disminuye a 79.48 y 64.28 representando ahorros en la carga térmica total anual del 12-13%, mientras que para reflectancias de 0.9, el ahorro en la carga térmica total anual, es de hasta el 16%. Es de observarse que la reflectancia juega un papel considerable en la reducción de la carga térmica de enfriamiento en la habitación.

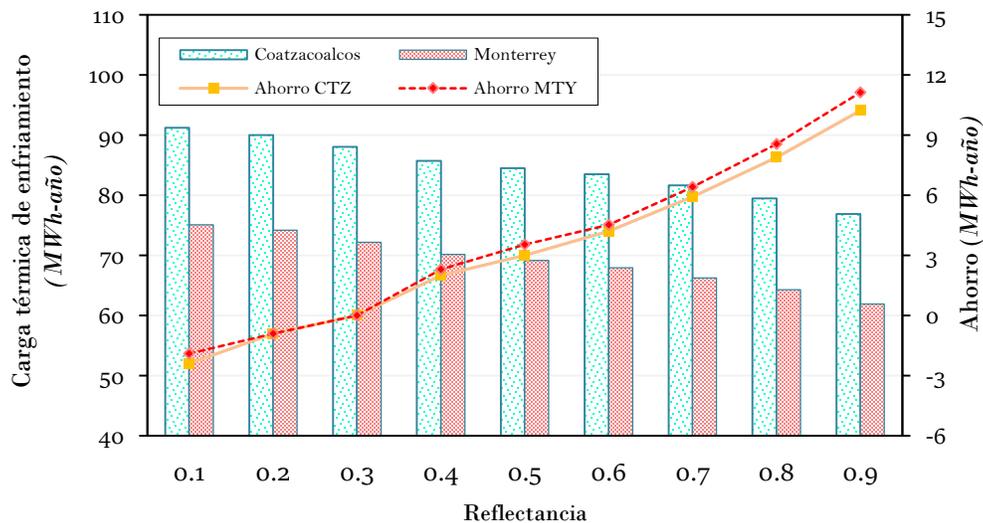


Figura 4.3 Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando la reflectancia de 0.1-0.9 para las ciudades de Monterrey y Coahuila de Zaragoza.

4.1.4 Efecto de ventanas

El efecto por el tipo de ventana se estudió simulando con nueve tipos de ventanas diferentes y variando la proporción ventana-pared (*WWR*) de 0 a 99%.

Tipo de ventana

En la **Figura 4.4** se presentan las cargas térmicas de enfriamiento y el ahorro anual, con diferentes tipos de ventanas en la habitación de estudio. Las características de las ventanas se presentan en el **Capítulo 3**, más específicamente en la **Tabla 3.2**. El caso base fue una ventana simple, de solo un vidrio claro (*V1*). La carga térmica para el caso de referencia (*V1*) es de 88.04 y 72.17 *MWh-año* para Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. En la figura se muestra que la carga térmica comienza a disminuir desde la ventana (*V2*), la cual es una ventana doble con vidrio claro, pero los ahorros comienzan a aumentar con la ventana doble low-e (*V3*) y una con vidrio simple con control solar (*V4*), las cuales generan ahorros de hasta 5 *MWh-año*. La carga térmica de enfriamiento disminuye considerablemente a partir de la ventana doble con control solar (*V5*) alcanzando ahorros de 7 *MWh-año*, lo que representa ahorros de 8 y 10% en la carga de enfriamiento total anual, para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. La carga térmica de enfriamiento con la (*V9*) low-SHGC-Ar Gold, disminuye a 77.62 y 62.30 *MWh-año* generando ahorros del 12 y 14% para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. Es de observarse que el tipo de ventanas tiene un impacto importante en la carga de enfriamiento de una habitación.

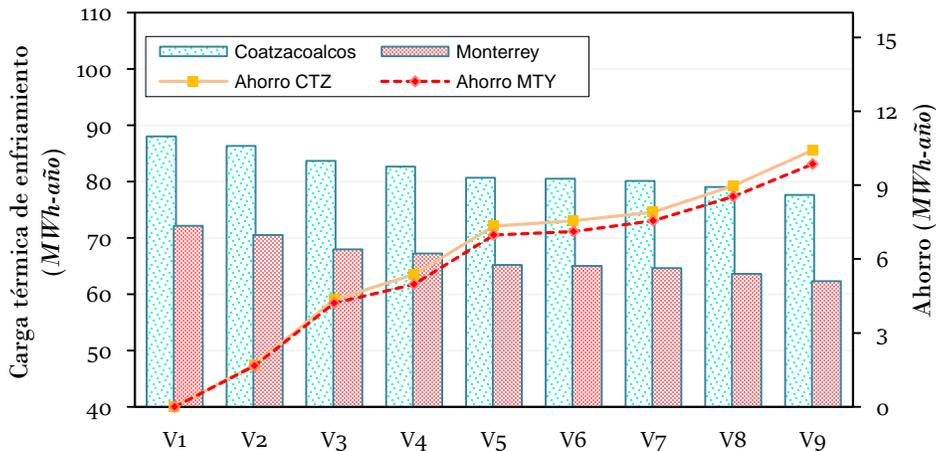


Figura 4.4 Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando el tipo de ventanas, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.

Proporción ventana-pared WWR

En la **Figura 4.5** se presenta la carga térmica de enfriamiento y el ahorro anual, al variar la proporción ventana-pared (*WWR*) de 0 al 99%, con intervalos de 5%, para la habitación de estudio. El caso base para determinar los ahorros, es de *WWR* del 40% con una carga térmica de 88.04 y 72.17 *MWh-año*. La carga térmica anual aumenta a medida que el porcentaje *WWR* aumenta, con una proporción ventana-pared del 99.9% (toda la pared vidriada) la carga térmica aumenta a 101.15 y 85.56 *MWh-año*, representando un aumento en la carga anual de 15-19% para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. También, se observa que a medida que la *WWR* disminuye, la carga térmica disminuye, con una proporción ventana-pared del 0% (sin vidriado), la carga térmica disminuye a 75.26 y 60.00 *MWh-año* representando ahorros en la carga térmica de enfriamiento anual del 15 y 17%. Además, es de observar que mantener un porcentaje de *WWR* de 15, 10 y 5%, generan ahorros considerables en la carga térmica de enfriamiento, con una *WWR* del 15% se generan ahorros de 7-8 *MWh-año*, mientras que con una *WWR* de 10% los ahorros son de 9 *MWh* en la carga térmica de enfriamiento anual. Es de observarse que, el porcentaje de proporción ventana-pared (*WWR*) influye en gran medida en la carga térmica de enfriamiento de la habitación, mientras el área de la ventana sea mayor, la carga térmica de enfriamiento aumenta debido a la cantidad de Q_{sol} que ingresa por el acristalamiento.

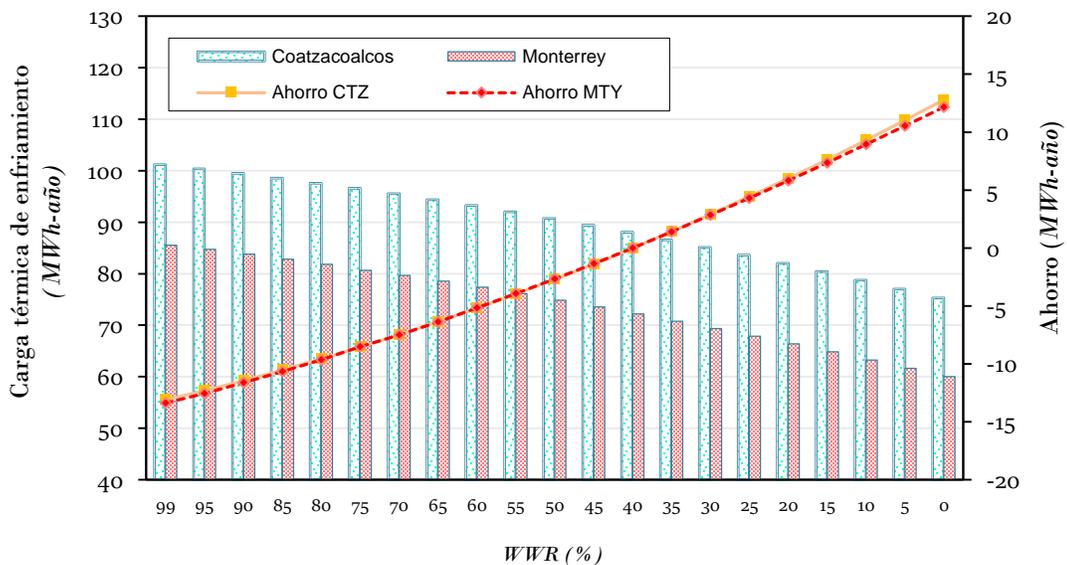


Figura 4.5 Carga térmica de enfriamiento y ahorro, variando el porcentaje *WWR*, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.

4.1.5 Sombreado

En la **Figura 4.6** se muestran las cargas térmicas de enfriamiento y el ahorro anual, cambiando el sombreado en la ventana sur y oeste considerando el sombreado en ambas ventanas. El caso de referencia se consideran dos ventanas sin sombreado, con una carga térmica de enfriamiento de 88.04 y 72.17 *MWh-año* para Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. Es de observar que, para la ventana sur, la carga térmica disminuye a 83.5 y 68.2 *MWh-año*, mientras que para la orientación oeste 82.0 y 66.70 *MWh-año* para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente, llegando a presentar ahorros de hasta el 8%. La carga térmica con ambas ventanas con sombreado disminuye a 78.00 y 62.20 *MWh-año* alcanzando ahorros de hasta del 11-14% para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey. Es de observar que el sombreado en las ventanas ayuda a generar ahorros significativos en la climatización de la habitación.

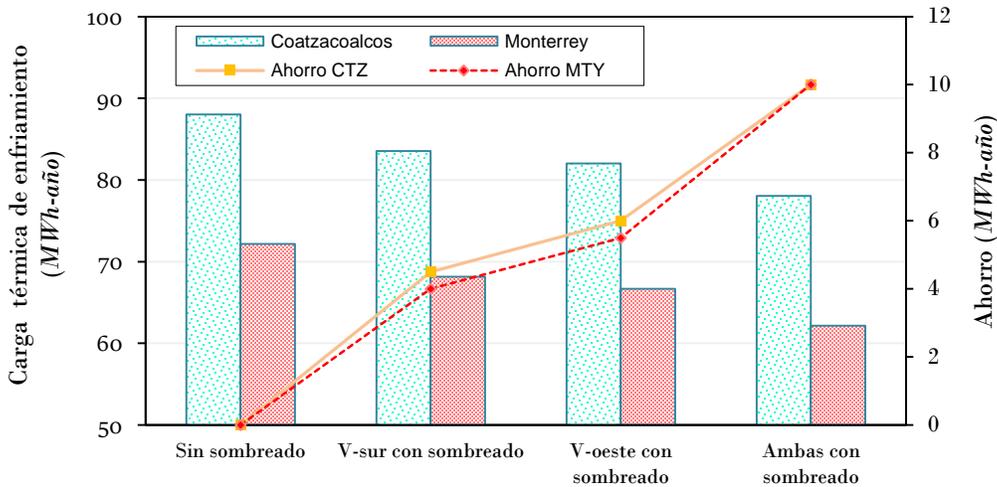


Figura 4.6 Carga térmica de enfriamiento y ahorro, añadiendo sombreado en las ventanas sur y oeste, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.

4.1.6 Propiedades termo físicas de los materiales

En la **Figura 4.7** se presentan las cargas térmicas de enfriamiento y los ahorros anuales para la habitación de estudio, considerando los materiales de construcción para paredes como se muestra en la **Tabla 4.1**. Para el caso base, los materiales que se utilizan, es ladrillo rojo, con el cual se presenta una carga térmica en la habitación de referencia de 88.04 y 72.17 *MWh-año*, para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente. Para *M-2*, la carga térmica disminuye a 84.04 y 68.17 *MWh-año* para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente, presentando ahorros del 6%. Para *M-3*, *M-4* y *M-5* los ahorros comienzan a ser similares para la carga de enfriamiento, llegando a generar ahorros del 8%. Es de observarse que, al variar el tipo de material, no se generan ahorros significativos en la carga térmica de enfriamiento.

Tabla 4.1 Materiales de construcción utilizados.

Nombre	Material
M-1	Ladrillo
M-2	Ladrillo arcilla
M-3	Tabicón
M-4	Tepetate

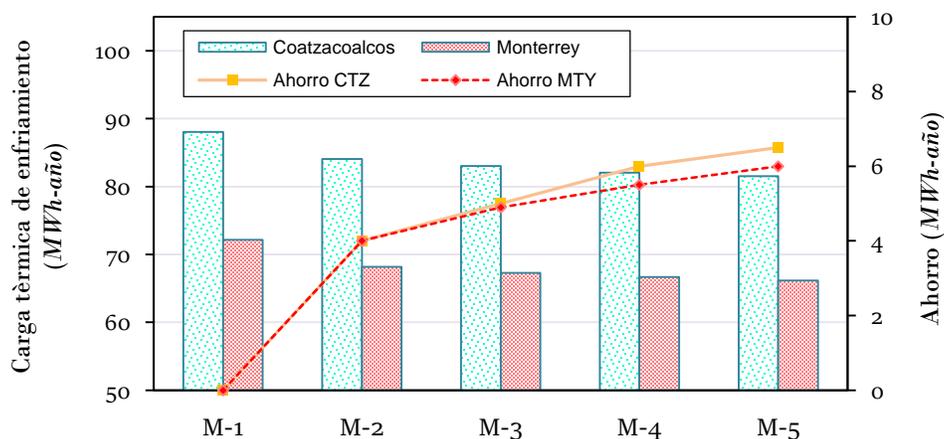


Figura 4.7 Carga térmica de enfriamiento y ahorro, cambiando los materiales de construcción, para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.

4.1.7 Vegetación

En la **Figura 4.8** se presenta la carga térmica de enfriamiento y los ahorros anuales de las combinaciones de pared/techo como se muestra en la **Tabla 3.5** de la **Sección 3.1.7**. La combinación *PT-1* es una pared/techo convencional sin vegetación con una carga térmica de enfriamiento de 88.04 y 72.17 *MWh-año*. La carga térmica, disminuye al añadir cubierta verde en pared/techo, es de observar que la carga térmica para la combinación *PT-2* (pared verde y techo convencional) disminuye a 82.04 y 66.17 *MWh-año*, logrando ahorros en la carga térmica de 7 y 8% para las ciudades de Coahuila y Monterrey, respectivamente. La combinación *PT-3* (pared convencional y techo verde) disminuye la carga térmica en 66.29 y 55.80 *MWh-año* generando ahorros de 7 *MWh-año* lo que representa ahorros del 10 y 11% en la carga total anual para las ciudades de Coahuila y Monterrey. Es de observarse que para la configuración *PT-4* (techo y pared verde) la carga térmica disminuye a 76.54 y 62.17 *MWh-año*, generando ahorros de hasta 12 *MWh-año*, lo que representa ahorros en la carga total anual de 13-14% para las ciudades de Coahuila y Monterrey, respectivamente. Es de observarse que, la cubierta verde en techos y paredes ayuda a reducir la carga térmica de enfriamiento en la habitación de estudio.

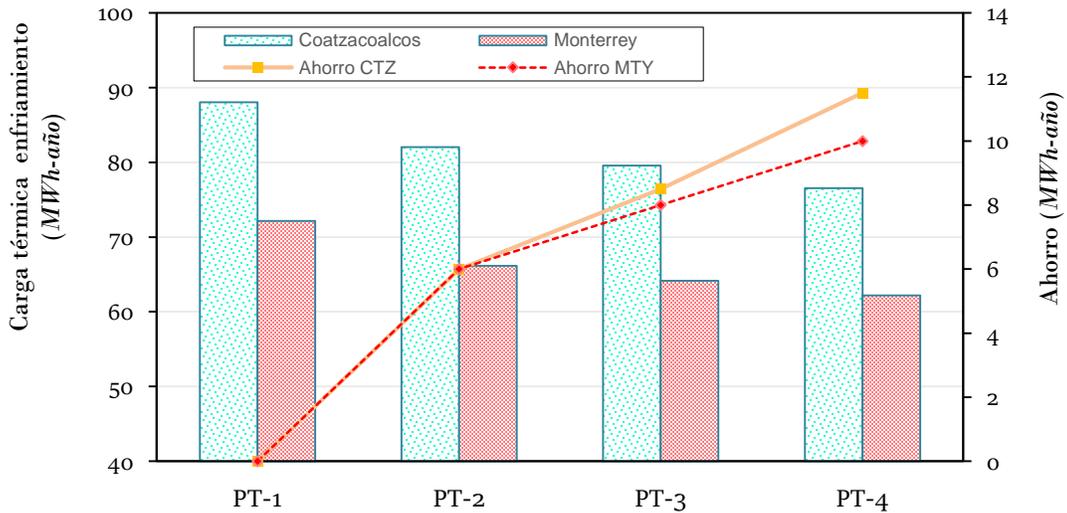


Figura 4.8 Carga térmica de enfriamiento y ahorro, cambiando la vegetación en paredes y techo, en las ciudades de Monterrey y Coahuila.

4.1.8 Análisis de todas las estrategias

En la **Tabla 4.2** se presentan los ahorros en la carga térmica de enfriamiento al utilizar las estrategias de mitigación. La *EM-1* es el caso base sin *EM*, por lo cual los ahorros son cero. Es de observarse que, *EM-2*, es la estrategia que presenta menores ahorros, mientras que, *EM-3* a *EM-8*, los ahorros comienzan a ser significativos, teniendo ahorros promedio de 10 *MWh-año*. La *EM-9* presenta los mayores ahorros en las cargas de enfriamiento, llegando a ser de 29 y 40 *MWh-año* para Monterrey y Coatzacoalcos, respectivamente. *EM-10* es la combinación de *EM*, las cuales son; enfoque adaptativo (Guía A de CIBSE), orientación (90°C), tipo de ventana (low-SHGC-Ar), *WWR* (10%) y la reflectancia (0.8), llegando a generar ahorros en la carga térmica total anual de 46 y 59 *MWh*, para Monterrey y Coatzacoalcos respectivamente.

Tabla 4.2 Ahorro en la carga térmica de enfriamiento *MWh-año* por estrategia.

		Ahorro en <i>MWh-año</i>	
EM/Ciudad		Monterrey	Coatzacoalcos
EM-1	Caso base	0	0
EM-2	Materiales	6	7
EM-3	Sombreado	10	10
EM-4	Tipo de ventana	10	10
EM-5	Reflectancia	10	11
EM-6	WWR	11	11
EM-7	Vegetación	10	11
EM-8	Orientación	12	14
EM-9	Adaptativo	29	40
EM10	Combinación	46	59

En la **Figura 4.9** se presenta el comparativo del ahorro de las cargas térmicas de enfriamiento en *MWh-año* de las estrategias de mitigación energética para la habitación de estudio. Es de observarse que el enfoque adaptativo y la combinación de las *EM*, ayudan a generar ahorros realmente significativos.

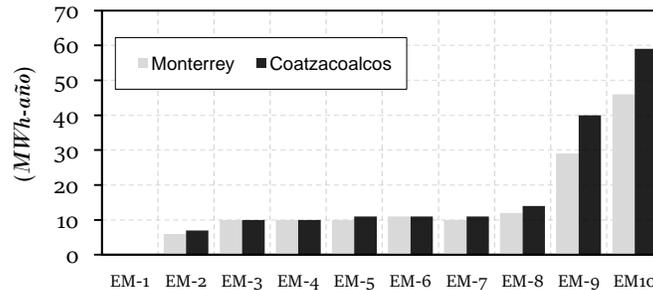


Figura 4.9 Ahorros de la carga de enfriamiento anual por estrategia pasiva en *MWh-año* para la ciudad de Monterrey y Coatzacoalcos.

4.1.9 Comparativo de cargas térmicas con las diferentes estrategias de mitigación energética

Coatzacoalcos

En la **Figura 4.10** se presentan las cargas térmicas de enfriamiento mensuales de la habitación con las estrategias de mitigación por separado, para la ciudad de Coatzacoalcos. La línea negra punteada corresponde al caso de referencia, es de observarse que en el mes de mayo se presentan las mayores cargas alcanzando 10.33 *MWh* y los meses de diciembre y enero las menores de 3.39 y 4.49 *MWh*, respectivamente. Es de observarse que el enfoque adaptativo, es la estrategia de mitigación que presenta los mayores ahorros en la carga térmica de enfriamiento, para el mes de mayo disminuye la carga térmica a 6.03 *MWh* siendo un ahorro de hasta el 42%. La línea punteada color lila, es la combinación de distintas estrategias, las cuales son; el enfoque adaptativo (modelo de Guía A de CIBSE), la orientación (90°C), tipo de ventana (low-SHGC-Ar Gold), *WWR* (10%) y la reflectancia (0.8), es de observarse que los ahorros son aún mayores, reduciendo la carga térmica de enfriamiento a 4.21 *MWh* para el mes de mayo, representando ahorros del 60%. Es de observarse, que, las estrategias de mitigación energética ayudan a generar ahorros significativos en las cargas térmicas, es por eso que se recomienda considerar estrategias de mitigación energética en el diseño de los edificios.

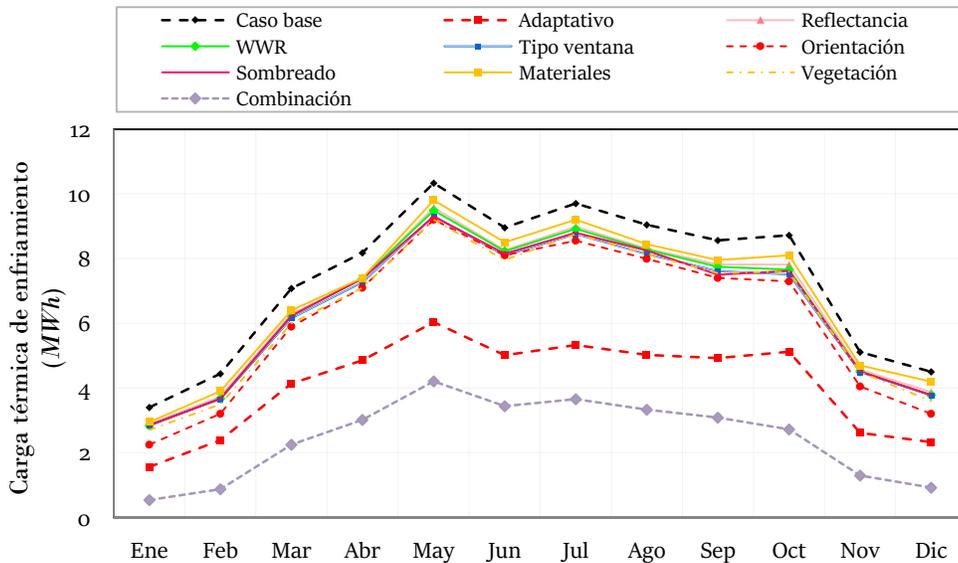


Figura 4.10 Carga térmica de enfriamiento y ahorro en *MWh*, con las diferentes estrategias de mitigación energética en Coatzacoalcos.

Monterrey

En la **Figura 4.11** se presentan las cargas térmicas de enfriamiento mensuales de la habitación con las estrategias de mitigación por separado para la ciudad de Monterrey. La línea negra punteada es el caso de referencia en donde se muestran las cargas térmicas de enfriamiento de la habitación convencional de manera mensual, es de observarse que en el mes de agosto presenta las mayores cargas de enfriamiento alcanzando 11.32 MWh . Es de observarse que el enfoque adaptativo, es la estrategia de mitigación que presenta los mayores ahorros en la carga térmica de enfriamiento, para el mes de agosto disminuye la carga térmica a 6.96 MWh generando un ahorro del 39%. La línea punteada color lila, es la combinación de distintas estrategias, las cuales son; el enfoque adaptativo (modelo de Guía A de CIBSE), la orientación (90°C), tipo de ventana (low-SHGC-Ar Gold), WWR (10%) y la reflectancia (0.8), es de observarse, que, la carga térmica disminuye considerablemente logrando reducir las carga a 4.67 MWh para el mes de agosto, logrando ahorros del 59% respecto al caso base. Es de observarse, que, las estrategias de mitigación en conjunto ayudan a reducir significativamente la carga térmica para todos los meses del año en la habitación de estudio.

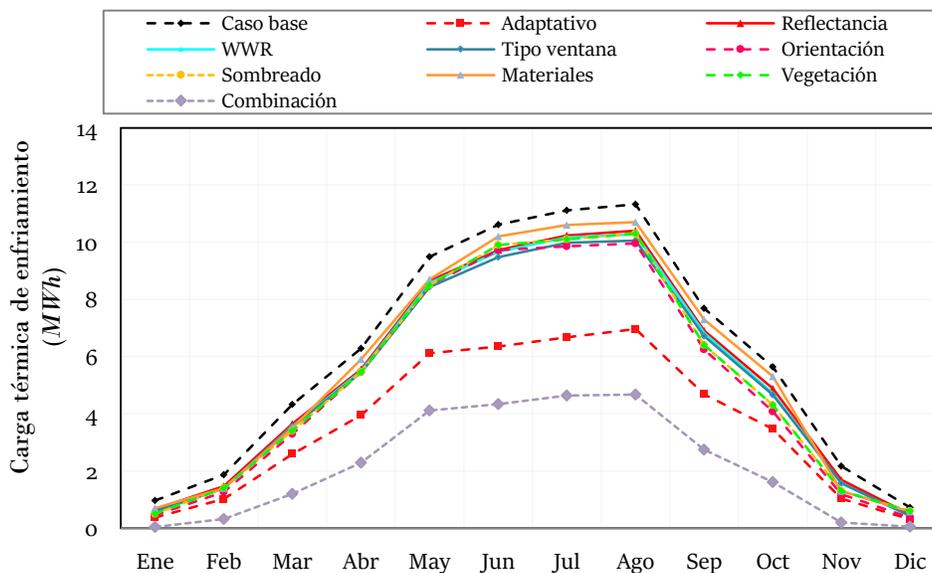


Figura 4.11 Carga térmica de enfriamiento y ahorro en MWh, con las diferentes estrategias de mitigación energéticas en Monterrey.

4.2 Factibilidad de climatización hacia cero energías convencionales

La factibilidad de climatizar con cero energías convencionales se estudia en términos de la carga térmica de enfriamiento y los costos asociados de la habitación de estudio, como se presenta a continuación.

4.2.1 Modificación de la habitación climatizada con estrategias de mitigación

En la **Tabla 4.3** se presentan los casos que se utilizaron para estudiar la factibilidad térmica y económica de la habitación. El caso A, es la habitación convencional sin estrategia de mitigación energética. El caso B utiliza la estrategia *EM-4* (tipo de ventana), *EM-5* (reflectancia), *EM-6* (*WWR*), *EM-8* (Orientación) y *EM-9* (Enfoque adaptativo). El caso C, se integra por *EM-3* (sombreado), *EM-7* (Vegetación) y *EM-9*. El caso D, se integra por *EM-4*, *EM-6*, *EM-7* y *EM-9*. El caso E, se integra por *EM-6*, *EM-8* y *EM-9*.

Tabla 4.3 Combinación de las estrategias de mitigación utilizadas para los casos de estudio.

EM	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
EM-1	Si	-	-	-	-
EM-2	-	-	-	-	-
EM-3	-	-	Si	-	-
EM-4	-	Si	-	Si	-
EM-5	-	Si	-	-	-
EM-6	-	Si	-	Si	Si
EM-7	-	-	Si	Si	-
EM-8	-	Si	-	-	Si
EM-9	-	Si	Si	Si	Si

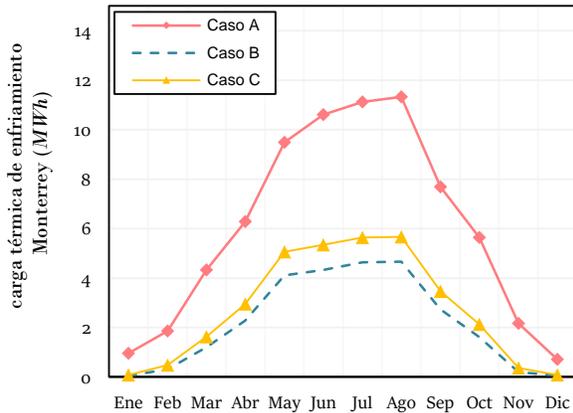
Comparativo térmico con una habitación convencional

En la **Figura 4.12** se presentan el comparativo en las cargas térmicas de enfriamiento de manera mensual para los casos de estudio; a) Caso A, B, C y b) Caso A, D y E para Monterrey; c) Caso A, B, C y d) Caso A, D y E para Coahuila. Es de observarse el caso A (habitación convencional) de las dos ciudades de estudio, presenta las mayores cargas de enfriamiento, ya que no cuenta con estrategias de mitigación energética. En la **Tabla 4.4** se presentan las cargas térmicas anuales mediante la integración de las cargas mensuales de los casos de estudio. El caso A (caso de referencia o la habitación convencional) presenta una carga térmica de 72.17 y 88.04 *MWh-año* para las ciudades de Monterrey y Coahuila, respectivamente. Es de observarse que la disminución de las cargas térmicas de los distintos casos es significativa respecto al caso base, el porcentaje de ahorros es por arriba del 50%

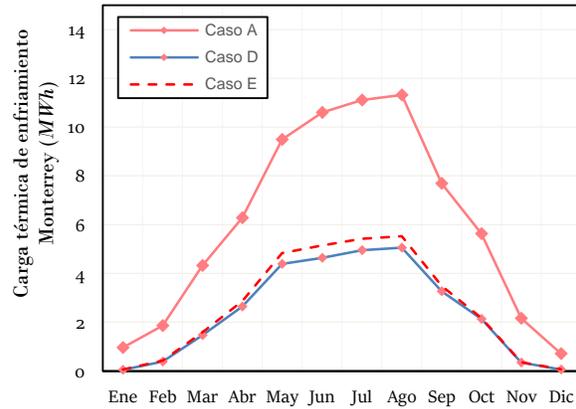
para todos los casos. El caso B y D son los que generan un mayor porcentaje de ahorro entre el 59-67%, mientras que los casos C y E generan ahorros del 54-57%, para Coatzacoalcos y Monterrey, respectivamente.

Tabla 4.4 Carga térmica anual de los casos de estudio para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos.

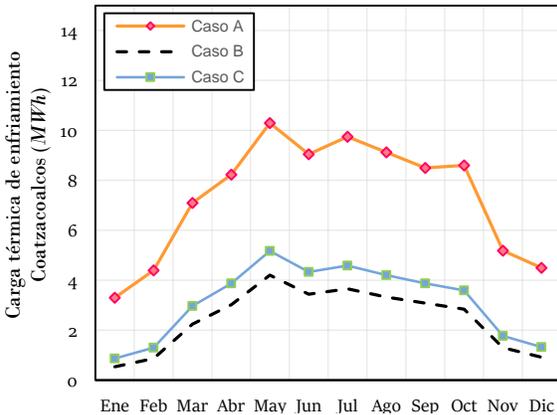
Casos/Ciudades	Carga térmica (MWh-año)				
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D	Caso E
Monterrey	72.17	26.20	31.96	29.40	32.89
Coatzacoalcos	88.04	29.35	37.88	35.11	37.87
Porcentaje de ahorro (%)	0	64-67	56-57	59-60	54-57



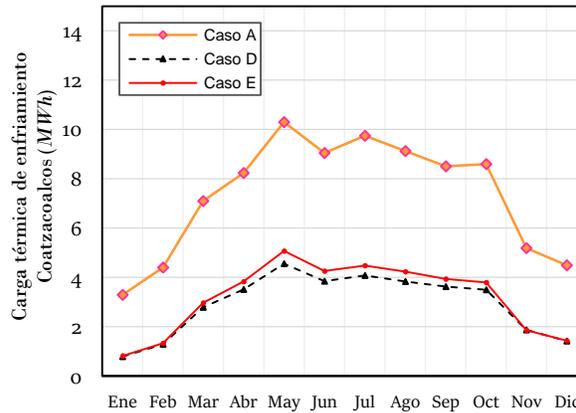
a)



b)



c)



d)

Figura 4.12 Cargas térmicas de enfriamiento mensuales (MWh); a) Caso A, B y C para Monterrey; b) Caso A, D y E para Monterrey; c) Caso A, B y C para Coatzacoalcos y d) Caso A, D y E para Coatzacoalcos.

El caso B es el caso que presenta mayores ahorros térmicos en la habitación de estudio para las ciudades de Monterrey y Coatzacoalcos, generando ahorros de hasta el 67% en la carga térmica total anual, debido a ello, el caso de estudio B es el más adecuado térmicamente para la habitación convencional.

4.2.2 Evaluación económica de la habitación diseñada con EM

La evaluación económica se realizó con la metodología presentada en la **Sección 2.6**, que consiste en evaluar los ahorros energéticos y determinar la viabilidad mediante indicadores económicos. El caso de estudio evaluado fue el caso B, ya que generó los mayores ahorros en la carga térmica de enfriamiento para la habitación de estudio. Las estrategias utilizadas en el caso B son, el enfoque adaptativo (Guía A de CIBSE), orientación (90°C), tipo de ventana (low-SHGC-Ar), WWR (10%) y la reflectancia (0.8). En la **Tabla 4.5** se presenta la comparación en los costos de inversión de la habitación convencional y la habitación con las estrategias de mitigación, solamente considerando los costos que necesitan algún tipo de inversión, los costos de las estrategias fueron tomados de la literatura y estos pueden variar en el mercado. Además, se considera un periodo de 20 años, por lo cual se dividen los 20 años entre el periodo de vida útil de cada estrategia, obteniendo así, la cantidad de veces que se cambiaría en ese periodo. El costo total de cada estrategia se multiplica por la cantidad de veces que se cambiaría en ese periodo, obteniendo así el costo total de cada estrategia, posterior se realiza la integración obteniendo el costo total neto de la inversión. Para el flujo de caja solo se considera el beneficio, restando el costo de la energía de la habitación convencional al costo de la energía con uso de estrategias, únicamente para la energía eléctrica obtenida de la carga térmica de enfriamiento. Para este estudio no se considera costos por mano de obra, ni mantenimiento, solamente se considera el beneficio energético neto y la inversión de las estrategias de mitigación utilizadas.

Tabla 4.5 Comparación de los costos de inversión de la habitación convencional y la habitación con EM para determinar los ahorros económicos.

Estrategia	Habitación convencional			Habitación con EM			Periodo de vida útil y cantidad necesaria en 20 años			
	Costo (\$/m ²)	Área (m ²)	Costo (\$)	Costo (\$/m ²)	Área (m ²)	Costo total (\$)	Periodo de vida	Cant.	Costo Total (\$)	
Reflectancia	Techo	26.2	156.2	4,090.6	53.7	156.3	8,392.1	5	4	33,568.8
	Pared	24.0	100.0	2,400.0	53.7	100.0	5,371.0	5	4	21,484.0
Ventanas y WWR	WWR	70.0	20.0	1,400.0	70.0	5.0	-	-	-	-
WWR	Ventana	-	-	-	2,363.1	5.0	11,815.8	20+	1	11,815.9
Enfoque adaptativo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Orientación	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Total	7,890.63			25579.0				66,868.6
					Costo Total					\$58,977.60

Los costos de la energía eléctrica requerida en Coatzacoalcos para la habitación convencional y la habitación del caso B; es de 41,237.94 y 13,747.54 \$/año, respectivamente, logrando ahorros anuales de \$27,490.40 MXN. Los costos de la energía eléctrica requerida en Monterrey para la habitación convencional y la habitación del caso B; es de 32,332.16 y 11,737.60 \$/año, respectivamente, logrando ahorros anuales de \$20,594.56 MXN. En la evaluación se tomó en cuenta el VAN, la TIR y el periodo de recuperación de la inversión.

Evaluación económica para Coatzacoalcos

En la **Tabla 4.6** se presenta la tabulación de la progresión anual de los costos de la energía eléctrica y su valor actual VAN para la ciudad de Coatzacoalcos en un periodo de 20 años. El VAN total es de \$441,325.28 la TIR del 42% y el tiempo de recuperación de la inversión es de 2.36 años.

Tabla 4.6 Tabulación de la progresión anual de los costos de energía eléctrica y su valor actual para la ciudad de Coatzacoalcos.

Periodos	Flujos de caja	VAN de los flujos de caja	Flujo de caja acumulado
0	Inversión inicial	-\$58,977.60	-\$58,977.6
1	\$27,490.40	\$24,993.54	-\$33,984.1
2	\$30,239.44	\$24,995.82	-\$8,988.2
3	\$33,263.38	\$24,998.09	\$16,009.9
4	\$36,589.72	\$25,000.36	\$41,010.2
5	\$40,248.69	\$25,002.64	\$66,012.8
6	\$44,273.56	\$25,004.91	\$91,017.8
7	\$48,700.92	\$25,007.18	\$116,024.9
8	\$53,571.01	\$25,009.46	\$141,034.4
9	\$58,928.11	\$25,011.73	\$166,046.1
10	\$64,820.93	\$25,014.00	\$191,060.1
11	\$71,303.02	\$25,016.28	\$216,076.4
12	\$78,433.32	\$25,018.55	\$241,095.0
13	\$86,276.65	\$25,020.83	\$266,115.8
14	\$94,904.32	\$25,023.10	\$291,138.9
15	\$104,394.75	\$25,025.38	\$316,164.3
16	\$114,834.22	\$25,027.65	\$341,191.9
17	\$126,317.65	\$25,029.93	\$366,221.8
18	\$138,949.41	\$25,032.20	\$391,254.0
19	\$152,844.35	\$25,034.48	\$416,288.5
20	\$168,128.79	\$25,036.75	\$441,325.3
		Periodo de recuperación	2.36 años
	VAN TOTAL	\$441,325.28	

Evaluación económica para Monterrey

En la **Tabla 4.7** se presenta la tabulación de la progresión anual de los costos de la energía eléctrica y su valor actual VAN para la ciudad de Monterrey en un periodo de 20 años. El VAN total de periodo es de \$315,826.61, la TIR del 32% y el tiempo de recuperación de la inversión es de 3.15 años.

Tabla 4.7 Tabulación de la progresión anual de los costos de energía eléctrica y su valor actual para la ciudad de Monterrey.

Periodos	Flujos de caja	VAN de los flujos de caja netos	Flujo de caja acumulado
0	Inversión inicial	-\$58,977.6	-\$58,977.6
1	\$20,594.6	\$18,724.0	-\$40,253.6
2	\$22,654.0	\$18,725.7	-\$21,527.8
3	\$24,919.4	\$18,727.4	-\$2,800.4
4	\$27,411.4	\$18,729.1	\$15,928.7
5	\$30,152.5	\$18,730.8	\$34,659.6
6	\$33,167.7	\$18,732.5	\$53,392.1
7	\$36,484.5	\$18,734.2	\$72,126.4
8	\$40,133.0	\$18,735.9	\$90,862.3
9	\$44,146.3	\$18,737.7	\$109,600.0
10	\$48,560.9	\$18,739.4	\$128,339.3
11	\$53,417.0	\$18,741.1	\$147,080.4
12	\$58,758.7	\$18,742.8	\$165,823.1
13	\$64,634.6	\$18,744.5	\$184,567.6
14	\$71,098.0	\$18,746.2	\$203,313.8
15	\$78,207.8	\$18,747.9	\$222,061.7
16	\$86,028.6	\$18,749.6	\$240,811.2
17	\$94,631.4	\$18,751.3	\$259,562.5
18	\$104,094.6	\$18,753.0	\$278,315.5
19	\$114,504.1	\$18,754.7	\$297,070.2
20	\$125,954.5	\$18,756.4	\$315,826.6
		Periodo de recuperación	3.15 años
	VAN TOTAL	\$315,826.61	

4.2.3 Evaluación del confort térmico PMV/PPD

En la **Tabla 4.8** se presenta el *PMV* y *PPD* mensual, para Coatzacoalcos y Monterrey, los parámetros de entrada se consideraron de acuerdo con la norma ISO 7730, los cuales se mencionan en la **Sección 2.7**. Para el factor de arropamiento, se tomaron en cuenta las estaciones del año; la temporada de otoño e invierno, se consideró 1 *clo*, ya que las personas comúnmente sienten más frío y utilizan cobijas; mientras que para primavera y verano se considera 0.4 *clo* ya que en el área en donde se encuentra la habitación de estudio, las pacientes utilizan ropa ligera. La sensación térmica para Coatzacoalcos es neutra y el porcentaje de insatisfechos es menor al 10%, lo que indica que se encuentra dentro del rango permitido por la norma ISO 7730, con excepción del mes de diciembre que se encuentra de neutro a ligeramente cálido con un porcentaje de insatisfechos mayor al 10%. Para Monterrey la sensación térmica se encuentra dentro lo permitido, con sensaciones neutras y *PPD* menores al 10%, a excepción de los meses de abril, noviembre y diciembre ya que el porcentaje de insatisfechos es relativamente alto y la sensación térmica para abril es de neutro a ligeramente cálido, mientras que, para noviembre y diciembre es de fresco a frío, por lo que no entra dentro de lo permitido por las normas.

Tabla 4.8 Sensación térmica y porcentaje de personas insatisfechas mensualmente, para las ciudades de Coatzacoalcos y Monterrey.

Mes	Coatzacoalcos		Monterrey	
	PMV	PPD (%)	PMV	PDD (%)
Enero	0.11	5.26	-0.48	9.78
Febrero	0.43	8.86	0.14	5.41
Marzo	-0.11	5.24	0.16	5.54
Abril	0.63	13.34	0.85	20.41
Mayo	0.43	8.84	0.45	9.31
Junio	0.10	5.22	0.31	6.99
Julio	0.39	8.11	0.43	8.94
Agosto	0.42	8.74	0.45	9.21
Septiembre	-0.30	6.81	0.30	6.92
Octubre	0.22	6.00	-0.50	10.20
Noviembre	-0.17	5.57	-1.52	52.13
Diciembre	-0.77	17.35	-1.70	61.94

Capítulo 5

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

En este capítulo se presentan las conclusiones del trabajo, y las recomendaciones para trabajos futuros.

5.1 Conclusiones

En el presente trabajo se estudió la factibilidad del diseño de una habitación tipo hospital climatizada hacia cero energías convencionales, en términos de las cargas térmicas de enfriamiento y los costos asociados.

La carga térmica anual de enfriamiento requerida para la habitación convencional tipo hospital es de 72.17 y 88.04 *MWh-año*, mientras que la habitación diseñada con estrategias de mitigación y el enfoque adaptativo solamente requiere una carga térmica de enfriamiento de 26.20 y 29.35 *MWh-año* con un ahorro en la carga térmica anual de 45.97 y 58.69 *MWh*, para Monterrey y Coahuila, respectivamente. El comparativo térmico de la habitación con las consideraciones del enfoque adaptativo y las estrategias de mitigación energética, presentó ahorros del 64-67% en la carga térmica de enfriamiento anual con respecto a la habitación convencional, para Monterrey y Coahuila, respectivamente. Es de observarse que la factibilidad de llegar a cero energías convencionales, no se cumplió, pero se observó que es posible reducir en un porcentaje considerable la carga térmica de enfriamiento anual, para una habitación de tipo hospital en climas cálidos de México.

En lo económico, el estudio se considera viable al tener; una *TIR* de 32-42%, lo que indica que es rentable; un *VAN* total de \$315,826.61 y \$441,325.28 ($VAN > 0$) lo que indica que el proyecto generará beneficios; y un periodo de recuperación de la inversión de 3.15 y 2.36 años, para Coahuila y Monterrey, respectivamente.

Además, considerando el confort térmico de la habitación, se observó que la sensación térmica se mantuvo en intervalos neutros en la mayoría de los meses y en un porcentaje de personas insatisfechas menor al 10%, a excepción de los meses de abril, noviembre y diciembre, en donde se presentó una sensación térmica de neutro a ligeramente cálido y de fresco a frío.

Las estrategias de mitigación y el enfoque adaptativo se evaluaron de manera conjunta y por separado. El ahorro en la carga total anual de cada estrategia varía de; orientación 5-17%, enfoque adaptativo 7-45%, reflectancia en techos y paredes 3-16%, tipo de ventanas 3-16%, *WWR* 2-17%, sombreado 7-16%, propiedades de los materiales 5-8%, vegetación en paredes y techos 7-14%, según la estrategia de mitigación que se utilice.

El uso del enfoque adaptativo y las estrategias de mitigación energética, ayudan a generar ahorros significativos en la carga térmica de enfriamiento, es por ello que se debe considerar este tipo de estrategias en habitaciones o edificios, para generar ahorros térmicos y económicos, además, de conservar la comodidad térmica de los ocupantes.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- Estudiar la factibilidad de diseñar una habitación en un clima cálido en términos de la temperatura interior de la habitación y cuantificar sus ahorros mediante la reducción de la temperatura.
- Realizar el mismo estudio para toda la edificación, considerando todas las zonas térmicas y el potencial de ahorro térmico total en la carga térmica de enfriamiento, implementando las estrategias de mitigación y el enfoque adaptativo.
- Realizar el mismo estudio para diferentes ciudades de la República Mexicana.
- Realizar el estudio térmico con estrategias de mitigación de consumo energético, considerando el enfoque adaptativo para edificios de interés social en México.
- Realizar el estudio para climas con alto potencial de calentamiento, evaluando el comportamiento de las estrategias y el enfoque adaptativo.
- Realizar estudios experimentales en una habitación tipo hospital, considerando las estrategias y el enfoque adaptativo, para determinar qué tan cerca o lejos se encuentran los resultados presentados.
- Proponer modelos adaptativos locales para habitaciones de tipo hospital en México, con mediciones *in situ* y encuestas a ocupantes.
- Implementar nuevas estrategias pasivas de mitigación energética en la habitación y evaluar su posible ahorro térmico.

Bibliografía

- Attia, S., y Carlucci, S. (2015). Impact of Different Thermal Comfort Models on Zero Energy Residential Buildings in Hot Climate. *Energy and Buildings*. 102, 117-128.
- ANSI/ASHRAE (2013). *ANSI/ASHRAE 55:2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Ashrae Vol. 2013.
- Ávila, A., Simá, E., Xáman, J., Hernández, I., Téllez, E., y Chagolla, M.A. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico. *Energy and Buildings*. 209.
- Azizpour, F., Moghimi, S., Salleh, E., Mat, S., Lim, C., y Sopian, K. (2013). Thermal comfort assessment of large-scale hospitals in tropical climates: A case study of University Kebangsaan Malaysia Medical Centre (UKMMC). *Energy and Buildings*, 64, 317–322.
- Arballo, B., Kuchen, E., Alamino, Y., y Frank A. (2016). Evaluación de modelos de confort térmico para interiores. Desarrollo tecnológico regionalmente sustentable, VIII Congreso Regional de Tecnología de la Arquitectura.
- Álvarez, G., Shah, B., Rubin, F., Gilbert, H., Dominguez, I., y Shickman, K. (2014). Evaluación del impacto del uso de “Cool Roof” en el ahorro de energía en edificaciones no residenciales y residenciales en México. Comisión Nacional de Uso Eficiente de Energía (CONUEE).
- Bhamare, D., Rathod, M y Banarjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—the state of art. *Energy and Building*. 198, 467-490.
- Castillo, J.A., Lira, A., Muñoz, J.J., Ramírez, C.A., Juárez, S.N., Rojas J., y Huelsz, G. (2011). Uso de sistemas pasivos de climatización en la zona de Temixco Morelos con clima cálido semi-húmedo. *Congreso Nacional de Energía Solar*. ANES.
- Cortés, S.E. (2015). Condiciones de confort térmico en áreas de climas templados, las plazas del centro histórico de la serena (Chile). Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. España.

- Chenari, B., Días Carrilho, J., y Gameiro M. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings. *Renewable and Sustainable Energy*. 59, 1426–1447.
- Chagolla, M.A, Álvarez, G., Simá, E., y Tovar, R. (2012). Effect of Tree Shading on the Thermal Load of a House in a Warm Climate Zone in Mexico. ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- Chagolla, M.A. (2012) Estudio de la demanda energética, la calidad térmica y la calificación energética de las viviendas en el estado de Morelos. Tesis Doctoral. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico. Morelos México.
- Duffie, J.A., y Beckman, W.A. (2013) *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wisconsin-Madison: Wiley.
- Eshraghi, J., Narjabadifam, N., Mirkhan, N., Khosroshahi, S, S., y Ashjaee, M. (2014). A comprehensive feasibility study of applying solar energy to design a zero-energy building for a typical home in Tehran. *Energy and Building*. 72, 329-339.
- Gallego, I. (2017). Análisis de la influencia de los modelos de confort adaptativo en los costos de ejecución para mejoramientos de la envolvente térmica de viviendas sociales en concepción, Chile. Tesis de Licenciatura. Universidad del Bío-Bío, Chile.
- Giraldo, W., Herrera, C.A. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y desarrollo*. 35(1). 78-101.
- Godoy Muñoz, A (2012). El confort térmico adaptativo: Aplicación en la edificación en España. Tesis de maestría. Universidad politécnica de Cataluña, España.
- Griego, D., Krarti, M., y Hernández, A. (2015). Energy efficiency optimization of new and existing office buildings in Guanajuato, Mexico. *Sustainable Cities and Society*. 17, 132-140.
- Hernández, E., Álvarez, G., Chávez, Y. (2013). Impacto de las ventanas en el consumo energético de edificaciones residenciales: simulación en TRNSYS y RESFEN. Congreso Internacional Anual de la SOMIM. 1360-1368.

- Hsieh, C.M., Li, J.J., Zhang, L., y Schwegler, B. (2018). Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Building*. 159, 382–397.
- Humphreys, M.A. y Nicol, J.F. (2002). Outdoor temperature and indoor thermal comfort-raising the precision of relationship for the 1998 ASHRAE database of fields. *ASHRAE Transactions*. 206(2), 485-492.
- IEA (2019). The Critical Role of Buildings. Perspective for the Clean Energy Transition. *International Energy Agency*, 2019.
- ISO. (2005). ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. *Management*. 3, 605–615.
- Khalid, W., Ahmad, S., Bahadur, Hom, Yakub, F. (2019). Investigation of comfort temperature and thermal adaptation for patients and visitors in Malaysian hospitals. *Energy and Buildings*. 183, 484-499.
- Lin, Z., y Deng, S. (2008). A study on the thermal comfort in sleeping environments in the Subtropics-Developing a thermal comfort model for sleeping environments. *Building and Environment*. 43, 70-81.
- López, L.A y Flores, J.J (2017). Modelo de confort térmico Adaptativo en Tuxtla Gutiérrez. Semana Nacional de Energía (ANES) 2017.
- López, L.A., Flores, J.J., y Ríos, C. (2019). Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Building and Environment*. 150, 181-194.
- Marszal, A., Heiselberg, P., Bourrelle, y J., Mussall, E. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*. 43(4), 971-979.
- Marín, P., Saffari, M., de Gracia, A., Zhu, X., Farid, M., Cabeza, L y Ushak, S. (2016). Energy savings due to the use of PCM for relocatable light weight buildings passive heating and cooling in different weather conditions. *Energy and Building*. 129, 274-283.

- Manu, S., Shukla, Y., Rawal, R., Thomas, L. E., de Dear, R. (2016). Field studies of thermal comfort across multiple climate zones for the subcontinent: India Model for Adaptive Comfort (IMAC). *Building and Environment*. 98, 55-70.
- Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001. Eficiencia energética en edificaciones. Envoltante de edificios no residenciales.
- Norma Oficial Mexicana NOM-016-SSA3-2012. Que establece las características mínimas de infraestructura y equipamiento de hospitales y consultorio de atención médica especializada.
- Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2014. Eficiencia energética en Sistemas de alumbrado en edificios no-residenciales.
- Oropeza, I., Petzold, A., Bonilla, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*. 145, 251-258.
- Oropeza, I. (2019). The Influence of an Integrated Driving on the Performance of different Passive Heating and Cooling Methods for Buildings. *Buildings*. 9-11.
- Olivieri, F., Cocci, R., Redondas, D., Sanchez, J.A., Tascini, S. (2017). An experimental method to quantitatively analyse the effect of thermal insulation thickness on the summer performance of a vertical green wall. *Energy and Building*. 150, 132-148.
- Osmani, M., y O'Reilly, A. (2009). Feasibility of zero carbon homes in England by 2016: A house builder's perspective. *Building and Environment*. 44 (9), 1917-1924.
- Özdamar, M., y Umaroğullari. (2018). Thermal comfort and indoor air quality. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*. 5(3), 90-109.
- Perlova, E., Platonova, M., Gorshkov, A., y Rakova, X. (2015). Concept Project of Zero Energy Building. *Procedia Engineering*, 100, 1505-1514.

- Polo-Labarrios, M.A., Quezada, S., Sanchez, H., Escobedo, M.A., y Espinosa, G. (2020). Comparison of thermal performance between Green roofs and conventional roofs. *Case Studies in Thermal Engineering*. 21.
- Ran, J., y Tang, M. (2018). Passive cooling of the green roofs combined with night-time ventilation and walls insulation in hot and humid regions. *Sustainable Cities and Society*. 38, 466-475.
- Rojas, J., Huelsz, G., Tovar, R., Barrios, G., Lira, A., y Castillo, A. (2010). Energía y confort en edificaciones. *Revista Digital Universitaria*. 11(10), 1067-6079.
- Santamauris, M., Synnefa, A., y Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*. 85(12), 3085-3102.
- Sánchez, D., Rubio, C., Marrero, M., Guevara, F., y Canivell J. (2015). El enfoque adaptativo del confort térmico en Sevilla. *Hábitat Sustentable*, 7(2), 6-17.
- Sattayakorn, S., Ichinose, M., Sasaki, R. (2017) Clarifying thermal comfort of healthcare occupants in tropical region: A case of indoor environment in Thai hospitals. *Energy and Buildings*. 149, 45-57.
- Secretaría de Energía (SENER) Balance Nacional de Energía 2017.
- Secretaría de Energía (SENER) y Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) 2019. Consumo de electricidad de edificios no residenciales en México: la importancia del sector de servicios.
- Secretaría de Energía (SENER) 2015 Estudio de Eficiencia Energética en Hospitales.
- Semahi, S., Zemmouri, N., Sing, M y Attia, S. (2019). Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Building and Environment*. 161, 106-271.
- Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy & Buildings*. 39(11), 1167-1174.

- Taleb, H. (2014). Using passive cooling strategies to improve thermal performance and reduce energy consumption of residential buildings in U.A.E. buildings. *Frontiers of Architectural Research*. 3, 154–165.
- Tuan, A., Kumar, M., y Reiter, S. (2012). An adaptive thermal comfort model for hot humid southeast Asia. *Building and Environment*. 56, 291-300.
- Venegas, S.A., y Piderit M.B. (2018). Reflectancia de las envolventes verticales y su influencia sobre la disponibilidad de luz natural en el cañón urbano de la ciudad de Concepción. *Habitat -sustentable*. 8(1), 7-15.
- Wang, L., Gwilliam, J., y Jones, P. (2009). Case study of zero energy house design in UK. *Energy and Buildings*. 41, 1215–1222.
- Wang, F., Mengchieh, L., Tsungjung, C., and Yuquan, L. (2012). Field evaluation of thermal comfort and indoor environment quality for a hospital in a hot and humid climate. *HVAC&R Research*. 18 (4), 671-680.
- Yau, Y.H y Chew, B.T. (2013). Adaptive thermal comfort model for air-conditioned hospitals in Malaysia. *Building Services Engineering Research Technology*. 35(2), 117–138.
- Yang, L., Fu, R., He, W., He, Q., Liu, Y. (2020). Adaptive thermal comfort and climate responsive building design strategies in dry-hot and dry-cold areas: Case study in Turpan, China. *Energy and Buildings*. 209.
- Zhibin, W., Nianping, L., Pawel, W., Jingqing, P., Jingming, L., y Haijiao C. (2019). Adaptive thermal comfort in naturally ventilated dormitory buildings in Changsha, China. *Energy and Buildings*. 186, 56-70.